www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

9e JAARGANG No. 8, blz. 225-256 AUGUSTUS 1947

Philips Technisch Tijdschrift

BEHANDELENDE TECHNISCHE VRAAGSTUKKEN
SAMENHANGENDE MET DE PRODUCTEN, WERKWIJZEN EN ONDERZOEKINGEN
VAN DE N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN

REDACTIE: HET NATUURKUNDIG LABORATORIUM DER N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN, EINDHOVEN

HET ELECTRON VIJFTIG JAAR

door W. de GROOT.

537.122:537.533

In de publicatie „On Cathode Rays" van J. J. Thomson (Oct. 1897) werd het bestaan van vrije electronen voor het eerst onomstotelijk vastgesteld. Dit belangrijke artikel, dat juist 50 jaar geleden verscheen, wordt uitvoerig besproken. Vervolgens wordt een korte uiteenzetting gegeven betreffende de onderzoekingen die aan Thomson's publicatie voorafgingen en van de resultaten van de verdere theoretische bestudering der electronen. Ten slotte wordt een overzicht gegeven van een aantal technische toepassingen op het gebied der „electronica".

Inleiding

Indien wij aan de ontdekking van het electron een tijdstip willen verbinden is geen daartoe meer geschikt dan de verschijningsdatum in October 1897 van de publicatie „On Cathode Rays" door J. J. Thomson [1]). De onderzoekingen van Thomson hadden ten doel, meer bijzonderheden te weten te komen over de aard der kathodestralen, waarover toen ter tijd nog de meest uiteenlopende meningen bestonden.

Sommigen zagen in deze stralen geladen „deeltjes", anderen ontkenden dit deeltjeskarakter en meenden in hoofdzaak te doen te hebben met een verschijnsel in de „aether".

Thomson merkte op, dat een verklaring, die uitgaat van het deeltjeskarakter als werkhypothese, meer kans van slagen heeft en gemakkelijker aan bekende wetten (nl. der mechanica) te toetsen is, dan een verklaring op grond van een aetherhypothese, omdat de eigenschappen van de „aether" zelf te onvoldoende bekend waren om er conclusies op te baseren.

De experimenten, die beschreven worden, moesten dan ook dienen om de juistheid der deeltjestheorie op de proef te stellen („to test some of the consequences of the electrified-particle theory").

[1]) J. J. Thomson, On Cathode Rays, Phil. Mag. **44**, 293-316, 1897 (October, artikel gedateerd 7 Aug. 1897). De in dit artikel beschreven experimenten waren door Thomson gedeeltelijk reeds eerder gepubliceerd (Proc. Cambr. **9** (1897)) en vertoond (Royal Institution, Vrijdagavondvoordracht 30 April 1897, zie Electrician 21 Mei 1897).

Thomson's afbuigingsproeven

De proeven van Thomson hadden ten doel:

a) te verifiëren dat de kathodestralen een lading dragen en dat deze lading met de stralen meegaat, indien zij door een magneetveld worden afgebogen;
b) de kwalitatief bekende afbuiging in een electrisch veld, die ook op een lading wijst, kwantitatief te onderzoeken;
c) de energie der stralen te meten en door een combinatie van deze meting met die van de magnetische afbuiging de snelheid en de verhouding lading/massa te bepalen;
d) dezelfde grootheden te bepalen door een combinatie van de magnetische en de electrische afbuiging.

De kathodestralen werden bij al deze proeven steeds verkregen door een ontlading in een met een verdund gas gevulde buis, waarin electroden waren ingesmolten of vastgekit. Als spanningsbron diende een inductieklos of een galvanische batterij.

De onder (a) bedoelde proef, een verbeterde editie van een experiment van Perrin [2]), geschiedde met de buis van *fig. 1*. Kathodestralen verlaten de kathode K en bereiken door een opening in de anode A de ruimte R, waar ze door een magneetveld zo worden afgebogen dat ze door een opening

[2]) Bij de proef van Perrin was een Faraday-kooi recht tegenover de kathode geplaatst en er werd geconstateerd, dat géén lading aan de kooi werd toegevoerd als de kathodestralen door een magneet werden afgebogen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

in een geaarde cylinder B een tweede, daarbinnen geïsoleerd opgestelde, geleider D bereiken. Alleen indien de stralen de opening treffen, toont een met deze geleider verbonden electrometer een ladingstoeneming aan. Dit bewijst dat een lading onverbrekelijk met de kathodestralen is verbonden. Het teken van deze lading is negatief.

De magnetische afbuiging werd verder nog kwantitatief onderzocht in de buis van *fig. 2*, welke niets anders is dan een van electroden voorziene luchtpompklok. Het blijkt daarbij dat de stralen niet alle even sterk worden afgebogen (magnetisch spectrum) en dat de bestanddelen, die in de bundel het sterkst vertegenwoordigd zijn en die zich verraden door een sterke fluorescentie van de glaswand, niet dezelfde zijn als die het gas het sterkst doen lichten. Het meest opvallende bij deze buis was echter dat het uiterlijk van de afgebogen bundel bij gegeven spanning tussen anode en kathode steeds hetzelfde is, ongeacht de aard van de gasvulling.

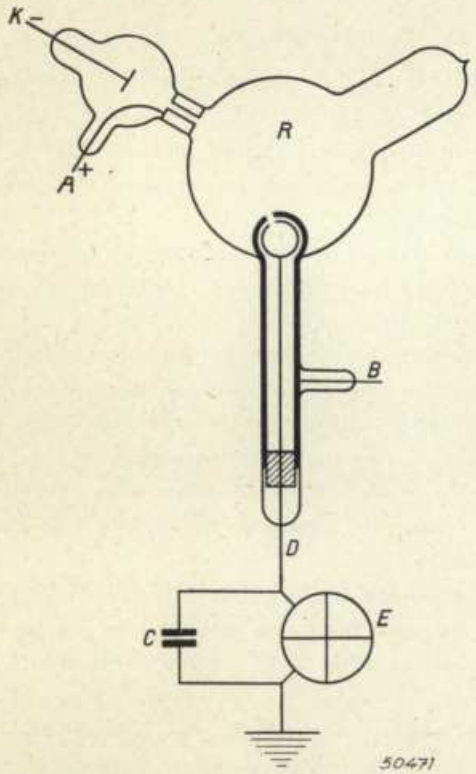

Fig. 1. Ontladingsbuis volgens J. J. Thomson, waarmee de (negatieve) lading van magnetisch afgebogen kathodestralen werd aangetoond. K kathode, A anode, B geaarde cylinder, D opvangelectrode, E electrometer, C condensator. Het magneetveld wordt door buiten de buis geplaatste draadspoelen opgewekt in de ruimte R.

De in (b) bedoelde afbuiging door een electrisch veld werd onderzocht in de buis van *fig. 3*, de voorloper van onze tegenwoordige kathodestraaloscillograaf.

In een soortgelijke buis, maar zonder afbuigplaten en voorzien van een afgeschermde electrode (als in fig. 1), werd de proef (c) uitgevoerd. De binnenste geïsoleerde electrode bevatte een thermo-element,

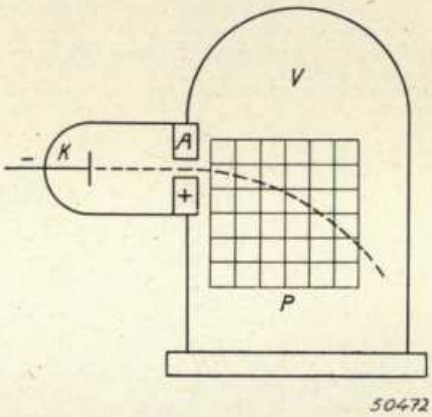

Fig. 2. Ontladingsvat waarin de magnetische afbuiging door Thomson werd onderzocht. De van de kathode K afkomstige stralen komen door een opening in de anode A in de klok V. De kromming in een magnetisch veld (door buiten de buis geplaatste draadspoelen opgewekt) wordt gemeten door de stralen te laten lopen langs een glazen plaat P waarop een lijnennet is aangebracht, dat tezamen met de kathodestralen wordt gefotografeerd.

dat door de kathodestralen werd getroffen en waarvan de temperatuurstijging in een bepaalde tijd werd gemeten. Tevens werd met behulp van een quadrantelectrometer de door het element opgevangen lading bepaald.

Komen, in de tijd t, N deeltjes op het thermoelement, die elk een lading e dragen, dan is de totale lading

$$Q = Ne \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Uit de temperatuurverhoging is tevens de totale energie W bekend:

$$W = N \cdot \frac{1}{2} mv^2, \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

waarin m de massa en v de snelheid van het deeltje voorstellen.

Ten slotte wordt de straal r gemeten van de cirkelbaan die de deeltjes in een veld H beschrijven. Hiervoor geldt [3]):

$$\frac{mv^2}{r} = evH \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

Uit (1), (2) en (3) volgt, als $rH = I$:

$$v = \frac{mv^2}{erH} = \frac{Nmv^2}{NerH} = \frac{2W}{QI} \quad \text{en} \quad \frac{m}{e} = \frac{rH}{v} = \frac{QI^2}{2W}.$$

[3]) Beter ware te schrijven evB. In electromagnetische eenheden, zoals Thomson gebruikt, is echter $B = H$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Op deze wijze werd in buizen met verschillende gasvullingen gevonden:

	lucht	H_2	CO_2
m/e	0,44	0,47	$0{,}45 \cdot 10^{-7}$ g/eme
v	0,28 tot $1{,}2 \cdot 10^{10}$ cm/sec		

De afbuigingsproeven (d) berusten op het meten van de richtingsveranderingen die de straal in een electrisch resp. magnetisch veld ondergaat. Is F de electrische veldsterkte, dan bedraagt de zijdelingse versnelling Fe/m, de zijdelingse snelheid, na het doorlopen van een afstand l tussen de platen, $(Fe/m)\ l/v$, zodat voor de afbuigingshoek ϑ geldt:

$$\vartheta = \frac{Fel}{mv^2}.$$

In het magnetische geval is de afbuiging $\varphi = l'/r$, als l' de in het veld doorlopen afstand voorstelt, zodat

$$\varphi = \frac{He\,l'}{mv}.$$

Het magnetische veld werd opgewekt door twee spoelen waarvan de doorsnede l' gelijk was aan de lengte l van de platen bij de electrische afbuigingsproef. Men mag dus stellen $l' = l$ en vindt dan

$$v = \frac{\varphi}{\vartheta}\frac{F}{H}$$

en

$$\frac{m}{e} = \frac{\vartheta}{\varphi^2}\frac{H^2}{F}\,l.$$

Deze proeven leverden:

	lucht	H_2	CO_2
m/e	0,12	0,15	$0{,}15 \cdot 10^{-7}$ g/eme
v	0,22 tot $0{,}36 \cdot 10^{10}$ cm/sec		

De verschillen in de waarden van m/e, volgens beide methoden verkregen, moeten aan systematische fouten worden toegeschreven. De overeenstemming tussen de waarden volgens éénzelfde methode bij verschillende gassen verkregen, wijst er op dat de kathodestraaldeeltjes onafhankelijk zijn van de aard van het gas. De tegenwoordig als juist aangenomen waarde van m/e is $0{,}5685 \cdot 10^{-7}$ g/eme ($e/m = 1{,}76 \cdot 10^7$ eme/g $= 1{,}76 \cdot 10^8$ coul/g.)

Omtrent de interpretatie van de gevonden waarde van m/e tastte Thomson aanvankelijk in het duister. Op grond van bepaalde overwegingen meende hij dat de waarde van e voor de „corpuscles" vele malen groter was dan de lading van een éénwaardig electrolytisch ion. Hij zag in, dat de „corpuscles" een belangrijke bouwsteen vormden van de materie en onderstelde dat de atomen elk een groot aantal van deze bouwstenen bevatten en wel meer, naarmate het atoomgewicht groter is. Ook het verschijnsel der electrische polarisatie, aanleiding gevend tot een diëlectrische constante (specifiek inducerend vermogen), verschillend van 1, werd door Thomson met de „corpuscles" in verband gebracht.

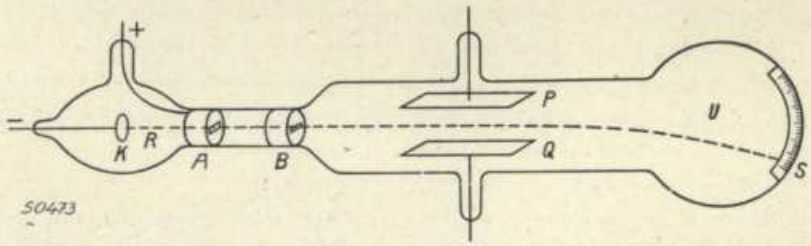

Fig. 3. Buis van Thomson voor het onderzoek der electrische afbuiging. De kathodestralen, die gevormd worden in de ruimte R, passeren de openingen in de electroden A en B. Hierdoor wordt een nauwe bundel toegelaten in de ruimte U waarin een platenpaar PQ is aangebracht. Q krijgt een positieve, P een negatieve potentiaal ten opzichte van B. De straal wordt in het electrische veld tussen P en Q gebogen, hetgeen waarneembaar wordt doordat de fluorescentievlek op de glaswand bij S zich verplaatst. S is een papieren schaal, waarop de verplaatsing wordt afgelezen.

De genoemde publicatie van Thomson eindigt met een beschouwing over de bouw van het atoom, waarin op grond van een proef met drijvende magneetnaaldjes [4]) een atoommodel wordt beschreven. Door middel van dit „model van Thomson" werd voor het eerst een poging gedaan, de eigenschappen van het periodiek systeem te verklaren.

Voorgeschiedenis

Bij alle eer, welke wij Thomson als hem toekomend geven, mogen wij zijn voorgangers niet

[4]) Thomson noemt als auteur een zekere professor Mayer. De proef bestaat in het laten drijven van een aantal korte staafmagneetjes die bijv. met de Z-pool opwaarts in kurken drijvertjes zijn gestoken. Zij stoten elkaar af, maar worden aangetrokken door een sterke, boven het vloeistofoppervlak geplaatste magnetische N-pool. Naar gelang van het aantal magneetjes vormen zich bepaalde configuraties.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

vergeten. Reeds in 1820 onderzocht Faraday ontladingen in verdunde gassen. Hij onderscheidde twee lichtverschijnselen: het negatieve glimlicht aan de kathode en de positieve zuil aan de anode, gescheiden door de donkere ruimte van Faraday. Plücker (1859) en Hittorf (1869) onderzochten de verschijnselen aan de kathode bij lagere gasdrukken. Hittorf beschreef de kathodestralen en hun afbuiging door een magnetisch veld, terwijl Goldstein (1876) de afbuiging in een electrisch veld constateerde. Voor Hittorf ging de stroom van de + pool naar de — pool. In zijn oog waren de verschijnselen aan de kathode de eindfase van het gebeuren in de ontlading. De gedachtensprong die nodig was om de volgorde om te keren en de ladingsverschijnselen toe te schrijven aan negatieve deeltjes die de kathode verlaten, was toen nog groot.

In 1879 herhaalde Crookes de proeven van Hittorf met verbeterde hulpmiddelen, vooral wat betreft de vacuumtechniek. Zijn voordracht, getiteld: „Stralende materie of de vierde aggregatietoestand", heeft er veel toe bijgedragen, de kathodestralen, die nu uitdrukkelijk als van de kathode uitgaande werden beschouwd, populair te maken.

In 1883 verklaarde Hertz zich aanhanger van de deeltjeshypothese en uitte de wenselijkheid, de magnetische en electrische afwijkingen te combineren en zo de snelheid der kathodestraaldeeltjes te bepalen, terwijl hij reeds eerder de mogelijkheid aangaf, langs electrische of magnetische weg de lading vast te stellen.

In 1887 ontdekte hij het foto-electrische effect, het vrijmaken van negatieve lading uit een metalen geleider, indien deze met ultraviolet licht wordt bestraald, een verschijnsel dat door Hallwachs (1888) nader werd onderzocht. In 1892 stelde Hertz vast, dat dunne metaallagen kathodestralen doorlaten. Aangespoord door Hertz slaagde Lenard er in 1894 in, de kathodestralen door een venster buiten de ontladingsbuis te laten komen en ze desgewenst in een zeer hoog vacuum te onderzoeken. Hij bestudeerde op deze wijze de magnetische afbuiging. In 1895 onderzocht hij de absorptie en verstrooiing in dunne metaalfolies. Hij vond dat deze toenemen met toenemende afbuiging (afnemende snelheid) en voor stralen met constante snelheid evenredig zijn met de doorlopen massa, onafhankelijk van de aard van het medium. In hetzelfde jaar 1895 ontdekte Röntgen de later naar hem genoemde stralen, welke ontstaan als snelle electronen een wand of een metalen geleider treffen.

Tegelijk met de zoëven geschetste ontwikkeling groeide de voorstelling, dat ook *in* de materie electrische lading atomair verdeeld voorkomt. Reeds omstreeks 1870 had Weber de hypothese uitgesproken, dat in metalen de geleiding plaats heeft door discrete ladingen, die zich van atoom tot atoom voortbewegen en ook verantwoordelijk zijn voor de „kringstromen van Ampère", dus voor het magnetisme.

In 1873 gaf Maxwell als zijn mening te kennen dat het ter verklaring van de verschijnselen der electrolyse noodzakelijk zou kunnen zijn een atomistische verdeling der electriciteit aan te nemen en in 1874 maakte Stoney een schatting van deze elementaire lading ($3 \cdot 10^{-11}$ ese) op grond van de toen bekende gegevens [5]). In 1891 noemde Stoney deze lading electron. Oorspronkelijk werd met dit woord de lading zelf en niet een bepaald, deze lading dragend, deeltje bedoeld. In deze zin bevatte het atoom zowel positieve als negatieve „electronen".

Later is de naam electron overgegaan op de door Thomson in de kathodestralen ontdekte „corpuscles" die wij thans „vrije electronen" noemen in tegenstelling met de „gebonden electronen" die in de atomen voorkomen.

De voorstelling, dat de ladingen in het atoom om evenwichtsstanden kunnen trillen en aldus de optische eigenschappen der materie bepalen, werd o.a. door Lorentz (1875) naar voren gebracht en door deze (1892) tot een theorie uitgewerkt.

In 1896 ontdekte Zeeman de magnetische splitsing der spectraallijnen. Tezamen met Lorentz leidde hij uit het teken van de cirkelvormige polarisatie die de gesplitste lijnen bij waarneming langs de krachtlijnen vertonen, af dat de deeltjes, die in de atomen voor de lichtemissie verantwoordelijk zijn, een negatieve lading dragen. Uit de grootte der splitsing kon hij bovendien een ruwe schatting maken van het quotient e/m dat in eme/g uitgedrukt de waarde 10^7 bleek te bezitten, dezelfde waarde die Thomson kort daarna voor de kathodestraaldeeltjes zou vinden [6]). Weliswaar onthield Zeeman zelf er zich toen van, aan deze uitkomst beschouwingen vast te knopen, maar toch mag men beweren dat door deze ontdekking de voorstelling van in het atoom „gebonden" electronen burgerrecht verkreeg.

Verdere ontwikkeling

Wij zagen dat Thomson, nadat het quotient m/e van de kathodestraaldeeltjes bepaald was, in

[5]) De thans als juist aangenomen waarde van e is $4{,}80 \cdot 10^{-10}$ ese $= 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb.

[6]) In zijn voordracht (zie noot [1])), wijst Thomson hierop.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

het onzekere verkeerde betreffende de lading e en aanvankelijk meende, dat deze veel groter zou zijn dan de lading van een eenwaardig ion. Sinds 1896 hielden Thomson en Rutherford zich bezig met de ionisatie van gassen door röntgenstralen. C. T. R. Wilson had gevonden, dat op de gasionen waterdamp kan condenseren, een verschijnsel dat hij later zou gebruiken om de banen van ioniserende deeltjes in een gas aan te tonen (Wilsonkamer 1912). Uit een schatting van het aantal waterdruppels, gecombineerd met een bepaling van de totale lading, kon Thomson (1898) de lading van één druppel bepalen, welke hij gelijkstelde aan de ionenlading. Hij vond, dat deze van dezelfde orde is als de lading der electrolytische ionen. Een soortgelijk resultaat was kort tevoren door Townsend gevonden voor de geladen waterdruppels die ontstaan boven het oppervlak van een electrolyt, als daaruit bij stroomdoorgang gas opborrelt. Wilson (1903) verbeterde de methode van Thomson door de invloed van een verticaal electrisch veld op de bezinkingssnelheid te bestuderen.

Daar bij de ionisatie door röntgenstralen niet een molecuul in twee ionen wordt gedeeld, zoals bij de electrolytische dissociatie, maar het atoom zelf in geladen bestanddelen wordt gesplitst (immers ook éénatomige gassen, zoals argon, worden door röntgenstralen geïoniseerd) kwam men tot het inzicht dat de gevonden lading der gasionen, welke van dezelfde orde was als de ionenlading bij de electrolyse, de lading e van het electron was.

De methode van Wilson werd later (1909) in het laboratorium van Millikan tot een precisiemethode ter bepaling van e uitgewerkt. Deze methode wordt thans in nauwkeurigheid nauwelijks overtroffen door de indirecte bepaling van de electrolytische eenheidslading. Zoals men weet, wordt deze afgeleid uit het electrochemisch aequivalent, in verbinding met de bepaling van het getal van Avogadro uit röntgeninterferenties bij kristallen.

Uit de waarden van e ($1{,}6 \cdot 10^{-19}$ coulomb) en e/m ($1{,}76 \cdot 10^{8}$ coul/g) volgt, dat de massa van het electron $9{,}1 \cdot 10^{-28}$ gram bedraagt, d.i. 1/1837 van de massa van een waterstofatoom.

De ontdekking der gebonden electronen leidde langzamerhand tot bepaalde voorstellingen betreffende de bouw van het atoom. Zoals wij zagen nam Stoney reeds aan dat in het atoom positieve en negatieve ladingen aanwezig zijn.

Lenard (1903) stelde zich voor, dat deze gepaard voorkwamen (dynamiden), terwijl Thomson, in aansluiting aan zijn boven reeds besproken modelproef, zich voorstelde dat het atoom bestaat uit een homogeen met positieve lading gevulde bol, waarbinnen de electronen onder invloed van de positieve aantrekking en de onderlinge afstoting, zekere evenwichtsstanden innemen.

Aan Rutherford (1911) danken wij de voorstelling, dat de positieve ladingen in het atoom verenigd zijn in een positieve kern, die ook draagster is van het grootste deel der atoommassa [7]).

Rutherford, die zich sinds 1897 bezighield met het onderzoek der radioactieve verschijnselen, werd tot deze voorstelling geleid door proeven over de verstrooiing van alphadeeltjes door dunne metaalfolies. Op de voorstelling van Rutherford van een positieve kern omgeven door een zwerm van negatieve electronen grondvestte Bohr (1913) zijn atoommodel en zijn ideeën over de bouw van het periodieke systeem, daarbij vooral gesteund door de experimenten van Moseley (1912) over de röntgenspectra der atomen.

In 1924 voorspelde De Broglie theoretisch de golfnatuur van het electron, die in 1927 door de proeven van Davisson, Germer en G. P. Thomson experimenteel werd bevestigd.

In 1925 verklaarden Uhlenbeck en Goudsmit een aantal onbegrepen verschijnselen in de spectra door aan het electron de eigenschappen van een tol toe te kennen. Deze zg. electronenspin is ook de voornaamste bron van het magnetisme.

Ten slotte ontdekte in 1932 Anderson in de kosmische straling het positieve electron, dat dezelfde verhouding e/m bezit, maar daarbij een positieve lading draagt.

Spoedig daarna werd gevonden, dat ook vele kunstmatige radioactieve isotopen positieve electronen uitzenden die het pendant vormen van de reeds uit de eerste dagen der radioactiviteit bekende negatieve electronenstraling (β-stralen). Bestaan en eigenschappen van het positieve electron waren door Dirac min of meer voorspeld. Het heeft de neiging zich hetzij met een atoomkern, hetzij met een negatief electron te verenigen onder uitzending van straling (annihilatie). Omgekeerd kan uit een stralingsquantum van voldoend hoge energie (>1 MeV) een electronenpaar (+en —) ontstaan.

De rol van vrije electronen in de techniek

Het is niet als een toeval te beschouwen, dat de ontdekking van het electron valt in een tijd, waarin door de ontwikkeling van de electrische gloeilamp de vacuumtechniek belangrijke vorderingen had gemaakt.

Reeds Edison had ontdekt, dat indien men in de ballon van een kooldraadlamp een derde electrode aanbrengt en deze verbindt met het positieve uiteinde van de gloeidraad, er een negatieve stroom door het vacuum naar deze electrode gaat. Deze

[7]) Zie bijv. W. de Groot, Kernphysica, Philips techn. T. **2**, 97-102, 1937.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

thermische emissie van gloeiende lichamen werd uitvoerig onderzocht door Richardson (1901). De negatieve deeltjes die een gloeidraad uitzendt zijn niet anders dan vrije electronen. Op deze wijze kunnen deze zich in een luchtledige ruimte bewegen zonder dat een „gasontlading" aanwezig is.

De proeven van Richardson leidden tot de uitvinding van de diode als gelijkrichter en als detector van electrische trillingen (Fleming 1904). Door toevoeging van een derde electrode of rooster ontstond de triode (Lee de Forest 1909), de stamvader waaruit de radio-ontvang- en zendbuizen in al hun schakeringen zijn voortgekomen.

Behalve door de mogelijkheid van het opwekken en het detecteren van electrische golven is de radiobuis van belang gebleken als versterker van zwakke wisselspanningen (radio-ontvang- en zendinstallaties, lijntelefonie, geluidsversterking, physische meetmethoden).

Uit de diode kwamen de gelijkrichtbuizen voort met hun diverse toepassingen (lading van accumulatoren, lastechniek, electrolyse).

Een belangrijke factor in de ontwikkeling van al deze toepassingen is de ontdekking van de electronenemissie van metaal-oxyden (Wehnelt 1903).

De vrijmaking van electronen uit metalen door bestraling met licht leidde tot de constructie van fotocellen. Bij moderne fotocellen wordt gebruik gemaakt van versterking door secundaire electronenemissie, een verschijnsel dat ook in radiobuizen wordt toegepast en dat hierin bestaat, dat een door electronen getroffen oppervlak zelf electronen uitzendt.

Rechtstreeks uit de proeven van Thomson is de electronenstraalbuis voortgekomen, die als electronenstraaloscillograaf in de techniek en in het laboratorium belangrijke toepassing vindt bij het zichtbaar maken en meten van wisselstromen en allerlei kortstondige verschijnselen en waarvan op hun beurt enerzijds de toepassingen in radar en televisie, anderzijds het electronenmicroscoop zijn afgeleid.

Legt men tussen kathode en anode van een ontladingsbuis een zeer hoge spanning, dan wordt een deel van de energie waarmee de electronen de anode treffen, omgezet in röntgenstralen (W. C. Röntgen 1895). De vacuum-röntgenbuis met gloeikathode (Coolidge 1913) ontwikkelde zich tot een modern apparaat, waarbij spanningen van 25 tot 2000 kV worden aangewend. Deze röntgenbuizen worden op uitgebreide schaal gebruikt in de medische diagnostiek en therapie en bij het materiaalonderzoek.

Ten slotte heeft het onderzoek der ontladingen in verdunde gassen in verbinding met de toepassing der oxydekathode geleid tot een aantal nieuwe lichtbronnen (natrium- en kwiklampen, fluorescentielampen), die behalve voor verlichtingsdoeleinden ook elders toepassing vinden (ultraviolet-bestraling, analyselamp).

Aldus is uit de ontdekking van het electron in het natuurkundig laboratorium een groot aantal toepassingen op industriële schaal voortgekomen, welke op velerlei wijze groot nut hebben afgeworpen en die op hun beurt weer bevorderend hebben gewerkt op het wetenschappelijk onderzoek. Niet zonder enige trots en voldoening mogen de natuurkundigen en technici terugzien op hetgeen op dit gebied in de afgelopen vijftig jaren, mede dank zij het werk van J. J. Thomson, werd volbracht.

Rectificatie

In het artikel van A. C. van Dorsten, W. J. Oosterkamp en J. B. Le Poole: „Een experimenteel electronenmicroscoop voor 400 kilovolt", in de vorige aflevering van dit tijdschrift, moeten de onderschriften van fig. 6 en 7 (pag. 199) worden verwisseld.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

NOOD-VOEDINGSSYSTEMEN MET ACCU-BATTERIJEN

door H. A. W. KLINKHAMER. 621.316.261

Nood-voedingssystemen dienen om een bedrijf dat uit het electrische net wordt gevoed, bijv. een telefoon- of verlichtingsinstallatie, ook bij een netstoring verder te doen werken. Een zeer geschikt systeem verkrijgt men, indien men het bedrijf uit een gelijkrichter voedt en een batterij van loodaccumulatoren permanent parallel hierop aansluit. De gelijkrichter moet zo geconstrueerd zijn, dat een constante uitgangsspanning verkregen wordt, die met name vrijwel onafhankelijk is van de optredende netspanningsschommelingen en de voorkomende belastingsvariaties. Dit is nodig om de batterij in „conserveringslading" te houden, dwz. permanent een spanning van 2,1 à 2,2 volt per cel aan de batterij te handhaven — de voorwaarde die volgens moderne bedrijfservaringen aan een batterij de langste levensduur verzekert. In verband hiermee duiden we de gelijkrichter die aan genoemde eisen voldoet, als „conserveringsgelijkrichter" aan. De voordelen van het geschetste nood-voedingssysteem ten opzichte van een dynamo-aggregaat en het ouderwetse twee-batterijen-systeem (met twee afwisselend het bedrijf voedende batterijen) worden uiteengezet. Ten slotte wordt aangetoond, dat een reeds eerder in het tijdschrift beschreven type gelijkrichter, met een hoog verzadigde transformator, zeer geschikt is als conserveringsgelijkrichter, en er worden twee speciale toepassingswijzen van zulk een gelijkrichter voor nood-voedingssystemen besproken.

Het electriciteitsnet is tegenwoordig wel de meest gebruikte bron, waaruit alle soorten bedrijven en installaties hun benodigde energie betrekken. De voordelen, die dit rechtvaardigen, zijn genoegzaam bekend. Toch bezit deze bron ook een nadeel, of beter gezegd, zij deelt een nadeel met vrijwel alle andere energiebronnen: zij is aan storingen onderhevig. Mag dit voor talrijke bedrijven en bijv. ook voor de voorziening van de particuliere huishoudingen geen ernstig bezwaar heten — mits de storingen niet te veelvuldig optreden of te lang duren —, zo zijn er toch ook gevallen waar een onderbreking van het bedrijf, langer dan enkele seconden of zelfs dat niet eens, als ontoelaatbaar wordt beschouwd. Om een sprekend voorbeeld te noemen: de verlichting van de operatietafel in een ziekenhuis mag tijdens een operatie onder geen voorwaarde uitvallen, wil het leven van de patient niet op het spel komen te staan [1]). Minder noodlottig, maar eveneens onduldbaar kan het weigeren van de verlichting in verkeerstunnels, bioscoop- of vergaderzalen zijn, waar een paniek zou kunnen ontstaan of een ongewenst gunstige toestand voor zakkenrollers. Een ander belangrijk voorbeeld is de telefoon: reeds de kleinste onderbreking van de energievoorziening kan hier zeer onaangename gevolgen hebben, doordat bijv. een juist onderweg zijnd telex-bericht verminkt zou overkomen.

Stelt men zich ten doel, in de genoemde en soortgelijke gevallen bij storing van het net het bedrijf toch aan de gang te houden, dan moet men over een nood-voedingsinstallatie als reserve beschikken. Als zodanig komen voornamelijk in aanmerking: een dynamo, aangedreven door een verbrandingsmotor; of een batterij van loodaccumulatoren [2]).

De volgende beschouwingen hebben betrekking op voedingssystemen die gebruik maken van het laatstgenoemde hulpmiddel, de accu-batterij. Deze bezit verschillende voor de hand liggende voordelen, zoals de eenvoudige installatie, het geruisloos werken, het zonder enige vertraging in functie treden. Om vooral de laatste eigenschap naar waarde te schatten, beschouwe men de maatregelen, die door sommige met dynamo-aggregaten werkende P.T.T.-bedrijven worden genomen om onderbreking bij een netstoring te vermijden: teneinde de aanlooptijd van de verbrandingsmotor, die bijv. 1/2 minuut kan bedragen, te overbruggen, wordt op de as van de dynamo nog een persluchtmotor gemonteerd, die onmiddellijk bij uitvallen van het net gaat lopen. Ook nu echter zou het nog enkele seconden duren vóór de dynamo op toeren komt. Om zelfs deze korte onderbreking te vermijden wordt bovendien nog een kleine electromotor opgesteld die tijdens het normale bedrijf de dynamo (onbelast) permanent doet meedraaien, terwijl dan de traagheid van een aangekoppeld vliegwiel de aanloopperiode van de persluchtmotor helpt overbruggen. Ten slotte is er nog een compressor nodig om de persluchtcylinder na een netstoring weer bij te vullen. Het valt niet te ontkennen, dat de batterij het eenvoudiger doet.

Toch heerst er bij ontwerpers van voedingsinstallaties veelal een zekere afkeer van oplossingen met batterijen. Uit het volgende zal, naar gehoopt wordt, blijken, dat deze afkeer ongegrond is, mits men de in het laatste decennium ontwikkelde inzichten omtrent het werken met batterijen in toepassing brengt. Het hier te beschrijven nood-voedingssysteem met een batterij blijkt zo-

[1]) Dit is zo belangrijk, dat men zich in dit geval niet alleen tegen netstoringen maar ook tegen een doorbranden van het gloeilampfilament moet beveiligen. Hiervoor zijn speciale gloeilampen ontwikkeld met een automatisch in werking tredend reserve-filament.

[2]) De in sommige gevallen toegepaste nikkelijzer-accumulatoren laten we hier buiten beschouwing.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

danige voordelen te bezitten, dat zijn toepassing op veel ruimere schaal in overweging verdient te worden genomen, zowel ter vervanging van dynamo-aggregaten als ter voorziening in gevallen, waar men het vroeger wegens de complicaties maar geheel zonder nood-voedingsinstallatie deed.

Hygiëne der loodbatterij

De genoemde afkeer wortelt in de opvatting, dat aan een accu-batterij onvermijdelijk grote kosten, veel onderhoud en veel zorg vastzitten. Wat het onderhoud en de zorg betreft: inderdaad kan de batterij niet zo maar, als een soort conservenblik met electrische energie, ergens in een hoek worden bewaard om haar in geval van nood aan te spreken. De opvatting, tot nog vrij kort geleden algemeen gehuldigd, was, dat men een batterij, om haar in de best mogelijke conditie te houden en haar de langste levensduur te verzekeren, moest laten werken. Van een batterij die niet op gezette tijden eens diep ontladen en dan weer hoog geladen werd, zouden de platen sulfateren, „verharden", waardoor het werkzame oppervlak en dus de capaciteit der batterij achteruitgaan.

Deze opvatting is sinds verscheidene jaren door langdurige, zorgvuldig gecontroleerde bedrijfservaringen weerlegd [3]), en men weet thans, dat een loodbatterij het langst leeft bij een geheel andere vorm van bedrijf, de zogenaamde conserveringslading. Alvorens echter hierop in te gaan, willen wij er op wijzen, dat de methode die men vroeger bij het gebruik van batterijen voor nood-voedingsinstallaties algemeen toepaste, in overeenstemming was met de beschreven, verouderde opvatting. Het bedrijf werd niet op het net, maar op een batterij aangesloten; er was een tweede batterij aanwezig, die, terwijl de eerste batterij het bedrijf voedde, door een gelijkrichter uit het wisselstroomnet werd geladen, om na ontlading van de eerste batterij de functie van deze over te nemen; in deze tijd werd dan de eerste batterij weer geladen, enz. Dit was het zg. twee-batterijen-systeem, dat in *fig. 1* schematisch is voorgesteld. Het is relatief kostbaar, want terwijl men er twee batterijen op na moet houden, beschikt men op elk ogenblik toch slechts, globaal gesproken, over de energie-inhoud van één batterij als reserve. Het vergt veel onderhoud en zorg, want telkens moeten de zuurdichtheid en de meteraanwijzingen worden gecontroleerd om te zien, of het ogenblik al gekomen is om de batterijen te verwisselen. Mocht dit ook maar een enkele maal vergeten worden, dan komen er ongelukken.

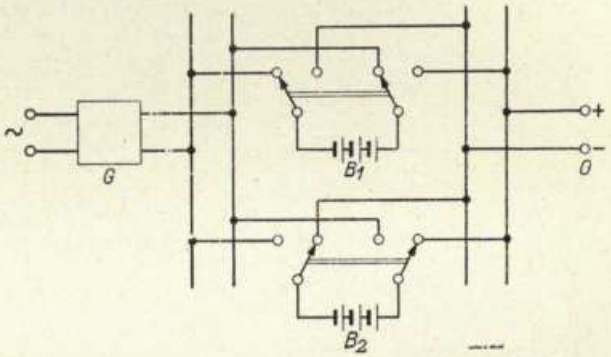

Fig. 1. Twee-batterijen-systeem. Terwijl de batterij B_2 het bij 0 aangesloten bedrijf voedt, wordt de batterij B_1 door de gelijkrichter G geladen. Is batterij B_2 leeg, dan worden beide schakelaars omgezet en de batterijen verwisselen dus van rol, totdat B_1 weer leeg is; enz.

Het vooroordeel, dat door een en ander tegen de batterijen als hulpmiddel voor een nood-voeding ontstond, laat zich begrijpen.

Tegenover de oude batterij-hygiëne kan nu de nieuwe worden geplaatst, het houden in conserveringslading. Hiermede wordt bedoeld, dat de batterij op volle lading wordt gehouden door haar doorlopend een geringe laadstroom toe te voeren, juist voldoende om de inwendige verliezen te dekken. Men bereikt dit door permanent een spanning van 2,1 à 2,2 volt per cel aan de batterij te handhaven.

Dat de levensduur van een batterij in deze bedrijfsvorm het langst zal zijn, kan begrijpelijk worden gemaakt door de volgende, enigszins vereenvoudigde overwegingen. Bij het afgeven van lading ontstaat loodsulfaat in fijn kristallijne vorm. Na een tijdsverloop van de orde van een week begint dit over te gaan in grof kristallijne vorm; dit is het boven reeds vermelde verschijnsel van het „verharden" der platen. Als er niet te veel tijd verstreken is, kan men weliswaar het loodsulfaat weer in fijn kristallijne vorm brengen door herhaalde diepe ontladingen en daarbij aansluitende overladingen. Bij deze laatste is het echter onvermijdelijk dat de batterij een tijdlang staat te „koken" of te „gassen". Dit gassen is zeer schadelijk voor de levensduur. Het PbO_2-huidje in het diepst van de poriën wordt er mechanisch door vernield, waardoor in eerste instantie het werkzame oppervlak vermindert. Later wordt op het blootgekomen lood nieuw PbO_2 gevormd, waardoor het werkzame oppervlak weer toeneemt. Dit gaat echter gepaard met dieper invreten, waardoor de plaat sponsachtig

[3]) Zie o.a. E. Anderfuhren, Techn. Mitt. Schweiz. T. T. **19**, 146-151, 1941; H. Grau, Die Stromversorgung von Fernsprechwähleranlagen, Verl. R. Oldenbourg 1943, blz. 14. — Vgl. ook U. Lamm, ASEA J. **20**, 3-9, 1947 (nr. 1). In dit artikel wordt een soortgelijke gedachtengang gevolgd als hier.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

wordt en sneller aan haar einde komt. Beide beschreven oorzaken van het verouderen: het verharden door het afgeven van lading, en het sponsachtig worden door het gassen, treden nu bij een batterij in conserveringslading niet op, daar deze geen lading afgeeft en niet gast.

Men kan derhalve zeggen, dat een (niet aan schokken blootgestelde) batterij, die permanent op een celspanning van 2,1 à 2,2 V gehouden wordt, practisch het eeuwige leven heeft, terwijl een batterij onherroepelijk veroudert, wanneer zij haar natuurlijke functie, het afgeven en weer opnemen van lading, verricht.

Eén-batterij-systeem contra twee-batterijen-systeem

De methode van de conserveringslading zou men voor een nood-voedingsinstallatie in practijk kunnen brengen volgens het schema van *fig. 2*. Hier is aangenomen, dat het bedrijf wordt gevoed uit het wisselstroomnet via een gelijkrichter. Eventueel, als het bedrijf even goed op wissel- als op gelijkspanning kan werken, kan men deze gelijkrichter achterwege laten. Er is één batterij aanwezig, die permanent op een eigen gelijkrichter aangesloten staat, welke in staat moet zijn om de batterij in conserveringslading te houden, resp. na eventuele ontlading op de juiste wijze te laden. Bij een netstoring wordt, al dan niet automatisch, de batterij van haar gelijkrichter overgeschakeld op het bedrijf, en bij terugkeren van de netspanning weer terug.

Nog eenvoudiger wordt de schakeling, indien men het bedrijf en de batterij parallel op eenzelfde gelijkrichter aansluit. Dit systeem, het practisch belangrijkste, is in *fig. 3* voorgesteld. In geval van een netstoring neemt de permanent aangesloten batterij zonder schakelen en zonder enige onderbreking de voeding van het bedrijf over.

Het aldus gekenschetste „één-batterij-systeem" heeft belangrijke voordelen boven het eerder beschreven twee-batterijen-systeem. In de eerste plaats is nu altijd de volle capaciteit van de batterij voor het voortzetten van het bedrijf in geval van nood beschikbaar. Gaat men van een bepaalde vereiste reserve-bedrijfsduur uit, dan kan men bij het één-batterij-systeem, globaal gerekend, met een half zo grote batterijcapaciteit volstaan als bij het twee-batterijen-systeem; investeringskosten en benodigde plaatsruimte worden dus gehalveerd. Bovendien komt ook nog het schakelbord met rails, omschakelaars, afzonderlijke netschakelaar en volt- en amperemeter voor elke batterij te vervallen.

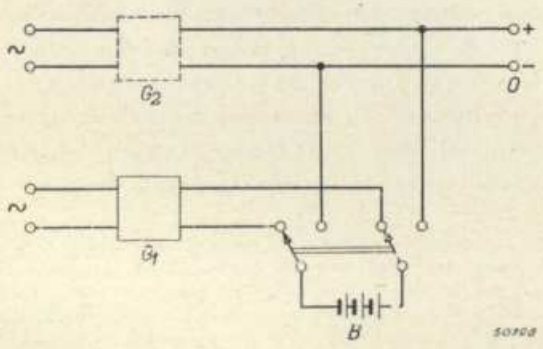

Fig. 2. Nood-voedingssysteem met slechts één batterij en twee gelijkrichters. Terwijl het bij *O* aangesloten bedrijf uit een gelijkrichter G_2 wordt gevoed (soms is ook rechtstreekse voeding uit het net mogelijk), wordt de batterij *B* uit een eigen gelijkrichter G_1 in conserveringslading gehouden. Bij een netstoring wordt *B* op het bedrijf overgeschakeld.

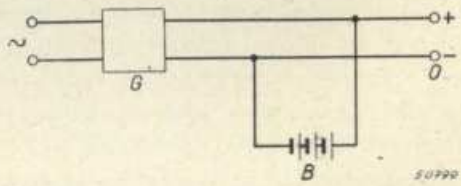

Fig. 3. Eén-batterij-systeem, waarbij het bedrijf *O* en de batterij *B* permanent parallel geschakeld zijn op een „conserveringsgelijkrichter" *G*.

Een tweede voordeel betreft het nuttig effect. Bij het twee-batterijen-systeem is elk kWh van de afgegeven energie tevoren in de batterij opgepot geweest, bij het één-batterij-systeem niet. Daar het gemiddelde nuttig effect van een batterij bij dit soort bedrijf volgens metingen in de practijk slechts ca 65% bedraagt, is het rendement van het normale bedrijf bij het één-batterij-systeem aanzienlijk hoger dan bij het twee-batterijen-systeem.

Aangenaam is ook, dat bij het één-batterij-systeem nooit gassen of bijtende dampen in de accumulatoren-ruimte optreden, daar een batterij in conserveringslading niet gast.

Ten slotte de wellicht belangrijkste voordelen: de levensduur van de in conserveringslading gehouden batterij is, zoals hierboven werd uiteengezet, aanzienlijk langer en zou, wanneer de batterij niet nu en dan eens bij netstoring in functie zou moeten treden, zelfs haast onbeperkt te noemen zijn. En de zorgen voor het onderhoud en de contrôle van de batterij kunnen tot vrijwel nihil worden gereduceerd: het in en buiten functie treden van de batterij geschiedt, bij het één-batterij-systeem volgens fig. 3, zonder enig toedoen van personeel of automatische schakelaars, en bij een geschikte constructie van de gelijkrichter (waarover straks meer) kan de installatie geheel aan zichzelf worden overgelaten; de bewaking kan zich, afgezien van kortstondig ingrijpen na een netstoring, bepalen tot een maandelijkse contrôle!

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

De conserveringsgelijkrichter

Als kenmerk van de conserveringslading werd hierboven genoemd, dat aan de batterij een spanning van 2,1 à 2,2 V per cel moet worden gehandhaafd. Het voldoen aan deze voorwaarde is het kernprobleem van het één-batterij-systeem.

Bij de schakeling volgens fig. 2 is voor de gestelde voorwaarde in hoofdzaak nodig, dat de laadgelijkrichter de eigenschap bezit, dat zijn uitgangsspanning slechts weinig varieert bij de onvermijdelijke schommelingen van de netspanning, die tot $\pm$ 5%, een enkele maal zelfs wel tot $\pm$ 10% kunnen bedragen. Bij de schakeling volgens fig. 3 die de voorkeur verdient wegens het wegvallen van alle schakelmanipulaties en die wij dan ook in hetgeen volgt uitsluitend willen beschouwen, wordt nog meer van de gelijkrichter gevergd: zijn uitgangsspanning moet hier ook onafhankelijk zijn van schommelingen in de belasting.

Gewone gelijkrichters bezitten deze eigenschappen in genen dele. Vooral daalt hun uitgangsspanning aanzienlijk als men de afgenomen stroomsterkte opvoert. Het gevolg is, dat de parallel geschakelde batterij bij elke stijging van de belasting gaat meedoen aan de stroomlevering aan het bedrijf en dus lading verliest. Daalt de gelijkrichterspanning met 10%, hetgeen bij gelijktijdig variëren van netspanning en belasting al heel gemakkelijk kan gebeuren, dan komt dit overeen met een afgifte van ongeveer 80% van de capaciteit der batterij [4]). Dat er aldus van de beschreven werking van het één-batterij-systeem weinig overblijft, behoeft geen betoog.

Toch is hiervoor vroeger — bij gebrek aan beter — de gewone gelijkrichter toegepast. Door voortdurende veranderingen van zijn instelling trachtte men dan de gelijkrichterstroom op elk ogenblik zoveel mogelijk gelijk te maken aan de verbruiksstroom plus een kleine overmaat om de batterijverliezen te dekken. Deze regeling met de hand is natuurlijk zeer gebrekkig, en de voordelen van het één-batterij-systeem worden er dan ook slechts zeer ten dele mee bereikt. Trouwens, in den beginne paste men het één-batterij-systeem wel in hoofdzaak toe om der wille van zijn eenvoud en het wegvallen van de schakelmanipulaties; van het belang van het principe der conserveringslading was men zich toen nog nauwelijks bewust, zodat men niet ten volle kon beseffen, welke voordelen men zich ten gevolge van het onvoldoende constant blijven van de gelijkrichterspanning liet ontgaan.

Eenmaal doordrongen zijnde van het belang der nieuwe batterij-hygiëne, moest men dus zoeken naar een gelijkrichter die ondanks netspanningsschommelingen en belastingsvariaties een constante gelijkspanning blijft leveren. Zulk een toestel willen wij, in verband met het doel om een batterij in conserveringslading te houden, als conserveringsgelijkrichter aanduiden [5]).

De gang der historie is nu geweest, dat zulke toestellen feitelijk reeds met een ander doel voor ogen zijn ontwikkeld, nl. voor gevallen waar de constante spanning niet terwille van een te laden batterij maar uit hoofde van het bedrijf zelf werd gevraagd. Dit is vooral het geval bij telefooncentrales. In een vroeger artikel [6]) is uiteengezet, dat hier de voedingsspanning aan zeer nauwe grenzen gebonden is met het oog op een behoorlijk functionneren der automatische kiesapparaten, terwijl anderzijds de belasting door het wisselende aantal der aan de gang zijnde telefoongesprekken sterk varieert. (Een tevens als reserve aangesloten batterij profiteert er natuurlijk van mee, als men de spanning om deze redenen constant houdt.)

Verschillende soorten van voedingsgelijkrichters zijn hiervoor uitgewerkt. Ten eerste is er een groep van constructies, waarbij de spanning wordt geregeld door een in de gelijkstroomketen geschakelde weerstand die automatisch toeneemt bij een stijging van de spanning. De regeling van de weerstand wordt bijv. bewerkstelligd door verschuiving van een contact door een servomotor die met een contactvoltmeter wordt bestuurd, of door een magneetspoel die zelf op de te regelen spanning is aangesloten, of langs andere, in ieder geval echter mechanische weg. Speciale maatregelen zijn hier meestal nodig om te vermijden dat door de traagheid der te bewegen massa's slingeringen ontstaan. Ook is slijtage onvermijdelijk. Wil men zulk een toestel als conserveringsgelijkrichter in een voedingssysteem volgens fig. 3 gebruiken, dan treedt een moeilijkheid op bij langdurige netstoringen: de batterij zal dan veel lading hebben afgegeven en sterk in spanning zijn gedaald. Doordat het

[4]) Het verband tussen spanning en ladingstoestand van een batterij is niet ondubbelzinnig. Slechts na afneming van heel geringe ladingshoeveelheden kan men zeggen, dat de batterij na laden tot haar oorspronkelijke spanning ook vrijwel haar oorspronkelijke ladingstoestand weer heeft bereikt. Is de batterij echter wat verder ontladen, dan moet zij eerst enige tijd op overspanning geladen worden om haar volledige lading terug te krijgen.

[5]) Er zij op gewezen, dat wij deze term in nauwere betekenis bezigen dan men hem in de literatuur gebruikt vindt; meestal wordt er nl. een gelijkrichter mee bedoeld die in staat is een onbelaste batterij in conserveringslading te houden, dus de lekverliezen te compenseren en zodoende de batterijspanning op 2,1 à 2,2 V per cel te houden. Wij daarentegen willen de benaming conserveringsgelijkrichter nu toepassen op een toestel dat de batterijspanning zowel onafhankelijk van de netspanning als van de belasting binnen de genoemde grenzen houdt.

[6]) H. A. W. Klinkhamer, Een gelijkrichter voor kleine telefooncentrales, Philips techn. T. **6**, 39-45, 1941.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

regelmechanisme na het terugkeren van de netspanning de uitgangsspanning van het toestel op de normale waarde instelt, zouden veel te grote stromen kunnen optreden. Hier zijn dus weer speciale maatregelen nodig, die het toestel compliceren — of men moet het toestel weer doorlopend laten bewaken en het personeel onmiddellijk na elke netstoring laten ingrijpen [7]).

Het nadeel van de massatraagheid en van de slijtage heeft men wel getracht te vermijden door in plaats van de mechanische regeling de reactantie van de wisselstroomzijde van de gelijkrichter, langs electrische of magnetische weg, door de uitgangsspanning te doen beïnvloeden. We noemen hier als voorbeeld het voorschakelen van een met de verkregen gelijkstroom voorgemagnetiseerde smoorspoel.

Een conserveringsgelijkrichter met hoog verzadigde transformator

Door Philips is enige jaren geleden een gelijkrichter geconstrueerd (zie het in noot [6]) aangehaalde artikel) waarbij de constantheid der spanning niet door een regelende terugwerking van de uitgangsspanning wordt verkregen, maar door toepassing van een hoog verzadigde transformator in een speciale schakeling, die in *fig. 4b* is weergegeven. (Fig. 4*a* geeft ter vergelijking de schakeling van een normale gelijkrichter.)

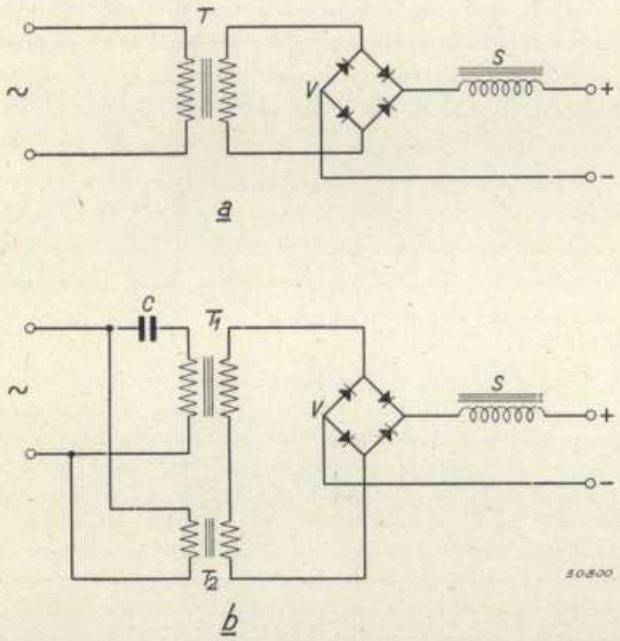

Fig. 4. *a*) Schakeling van een normale gelijkrichter, met transformator *T*, vier seleenventielen *V* in Graetz-schakeling, en vervlakkingssmoorspoel *S*.
b) Schakeling van een conserveringsgelijkrichter volgens een vroeger beschreven principe [6]). T_1 is een transformator met hoog verzadigde ijzerkern, *C* een condensator, T_2 een kleine normale transformator; *V* seleenventielen, *S* smoorspoel.

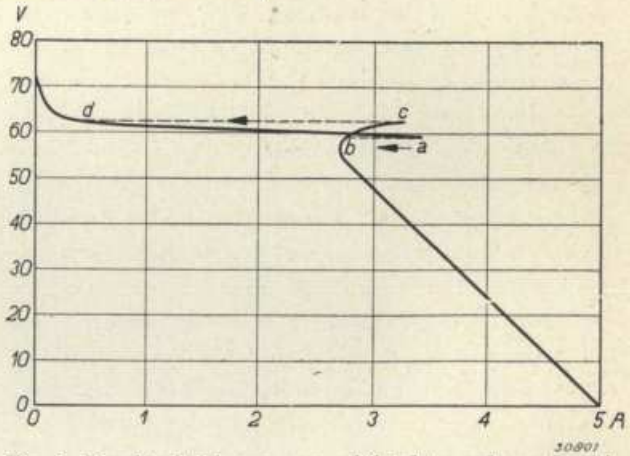

Fig. 5. Karakteristiek van een gelijkrichter volgens fig. 4*b*. De spanning varieert in een groot gebied van belastingsstromen (ca 0,3 tot 3 A) heel weinig. De karakteristiek bevat twee takken. Stijgt de belasting tot punt *a*, dan springt het werkpunt op de steile tak over ($a \rightarrow b$), zodat de afgenomen stroom begrensd blijft. Daalt de belasting, dan springt het werkpunt pas naar de vlakke tak terug wanneer de spanning van de permanent aangesloten batterij tot punt *c* opgeklommen is ($c \rightarrow d$).

De werking van deze schakeling is niet onmiddellijk te doorzien. Voor een bespreking hiervan en voor de afleiding van de karakteristiek van een dergelijke gelijkrichter uit de gegevens van de elementen en uit de magnetisatiekromme van de ijzeren kern zij verwezen naar het in noot [6]) aangehaalde artikel. Hier zullen alleen de eigenschappen van dit soort gelijkrichters, die hen speciaal voor het gebruik als conserveringsgelijkrichter geschikt maken, naar voren worden gebracht.

De geleverde gelijkspanning is in zeer hoge mate onafhankelijk van schommelingen in de belasting en in de netspanning. Dit blijkt uit *fig. 5* en *6*. Fig. 5 geeft de karakteristiek, dwz. de gelijkspanning als functie van de belastingsstroom, bij de nominale netspanning. Men ziet, dat de spanning in een groot gebied van stroomsterkten — in casu tussen ca 0,3 en ca 3 ampere — slechts met enkele procent (van 63 tot 60 V) varieert. In fig. 6 is de karakteristiek getekend voor drie verschillende waarden van de netspanning. Hieruit blijkt, dat de gelijkspanning ook bij verandering van de netspanning behoorlijk constant blijft, nl. binnen ca 3% bij 10% netspanningsverschil [8]).

[7]) Dat ondanks deze complicaties dit soort toestellen tot in de nieuwste tijd veelvuldig als conserveringsgelijkrichter voor het één-batterij-systeem worden toegepast, doet wel goed uitkomen welke waarde men tegenwoordig aan dit systeem hecht. Zo betoogt bijv. B. Stange in E.T.Z. **64**, 341-344 en 372-377, 1943, dat de complicaties bij de genoemde toestellen ruimschoots door de voordelen van het één-batterij-systeem worden gecompenseerd.

[8]) Er dient wel te worden opgemerkt, dat deze karakteristieken worden verkregen bij de nominale frequentie van het net. Vertoont de frequentie van het net belangrijke schommelingen — zoals in de tegenwoordige naoorlogse periode in vele landen het geval is —, dan heeft het hier beschreven gelijkrichtersysteem minder gunstige eigenschappen, met name is de uitgangsspanning dan niet voldoende constant.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Heeft het toestel zich daarmee reeds als conserveringsgelijkrichter gelegitimeerd, en heeft men op zijn credit nog geboekt de afwezigheid van traagheid en slijtage, dank zij het ontbreken van bewegende delen, zo bemerkt men bij nadere beschouwing nog een andere belangrijke eigenschap van het toestel, waardoor ook het laatste hierboven genoemde nadeel van vroegere oplossingen op ongekunstelde wijze wordt vermeden, nl. de noodzaak van het telkenmale ingrijpen van personeel direct na een netstoring. De karakteristiek van de gelijkrichter bestaat, zoals in fig. 5 is te zien, uit twee gescheiden, elkaar snijdende takken, een vlakke en een steile. De gelijkrichter is er op berekend, dat het werkpunt bij de normale voor het bedrijf vereiste stroomsterkten steeds op de vlakke tak blijft.

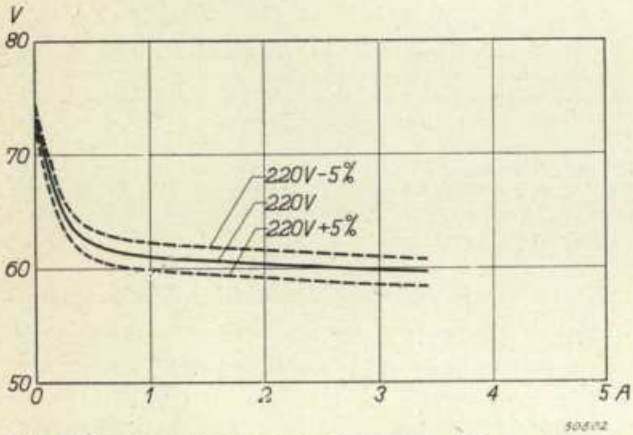

Fig. 6. Karakteristieken als in fig. 5, voor drie verschillende netspanningen (nominaal 220 V). Alleen de vlakke tak is getekend. Het valt op, dat de spanning met dalende netspanning stijgt en omgekeerd. De variaties zijn hierbij klein: ca 3% bij 10% netspanningsvariatie.

De veranderingen in de ladingstoestand van de batterij blijven hierbij uiterst beperkt. Komt er een belastingspiek, zo groot dat de grootste stroom van de vlakke tak er onvoldoende voor is, dan slaat de gelijkrichter om, dwz. het werkpunt springt volgens de onderste stippellijn (zie fig. 5) over naar de steile tak, van *a* naar *b*. De batterij levert nu het ontbrekende gedeelte van de totale stroom. Is de piek voorbij, dan blijft het werkpunt vooreerst op de steile tak van de karakteristiek, de gelijkrichter levert dus meer stroom dan het bedrijf verbruikt, het overschot dient om de batterij bij te laden. Met het hierdoor oplopen van de batterijspanning klimt het werkpunt langs de steile tak omhoog, totdat het punt *c* bereikt wordt, waar de gelijkrichter weer omslaat: het werkpunt springt langs de bovenste stippellijn naar de vlakke tak terug, naar punt *d*.

Treedt er een netstoring op, dan neemt de batterij het gehele bedrijf over en wordt zij dus, al naar gelang de duur der storing, min of meer ver ontladen. Ook al duurt de storing echter zo lang, dat de batterij belangrijk in spanning zakt, bij het terugkomen van de netspanning behoeft men toch niet te vrezen, dat er zeer grote stromen optreden. Immers, het werkpunt van de gelijkrichter komt dan dadelijk op de steile tak van de karakteristiek te liggen, op de hoogte die overeenkomt met de batterijspanning op dat ogenblik. De stroom blijft dus beperkt en kan nooit een gevaarlijke waarde aannemen, terwijl hiervoor geen ingrijpen van personeel nodig is. De batterij wordt nu tijdens het normale bedrijf weer geladen, totdat de batterijspanning tot de top van de steile tak (punt *c*) is opgelopen.

Weliswaar is de batterij dan nog niet geheel vol, want hiervoor moet het laden een tijdlang op een nog hogere spanning worden voortgezet. Te dien einde wordt een kleine „opjaag-gelijkrichter" in het toestel ingebouwd, die al dan niet automatisch in serie met de eigenlijke gelijkrichter kan worden geschakeld voor een snelle lading, en die na het bereiken van de gewenste overspanning van de batterij weer uitvalt. Ook al treedt het opjaaggelijkrichtertje niet automatisch in werking, zo ontstaat er toch geen noemenswaardig extra werk voor de bediening: aangezien het hier slechts een aanvullende lading betreft, behoeft het opjagen niet onmiddellijk na een netstoring plaats te vinden, maar is het voldoende als zich binnen een of twee dagen na de storing iemand naar het toestel begeeft om de opjaag-gelijkrichter in te schakelen. Neemt men als opjager weer een kleine conserveringsgelijkrichter, dan heeft men nog het voordeel dat er ook bij het snelle laden geen toezicht op het toestel nodig is.

In fig. 5 ziet men, dat de karakteristiek in het uiterste stukje links steil oploopt. Hier zou dus de spanning op de batterij hoger worden dan normaal gewenst is. In de meeste gevallen van normaal bedrijf wordt dit gebied echter nooit bereikt: het werkpunt kan er slechts komen indien de installatie een of twee dagen nagenoeg geheel onbelast blijft. Maar ook al komt het werkpunt eens in dit gebied terecht, zo wordt er toch geen schade aan de batterij toegebracht, daar de stroomsterkte waarmee de batterij dan verder geladen wordt, uiterst gering is. Overigens kan men desgewenst het oplopende stukje van de karakteristiek doen verdwijnen door een kleine rustbelasting aan te brengen.

De beschreven eigenschappen van deze conserveringsgelijkrichter maken het mogelijk, de accubatterij — afgezien van een contrôle bijv. eens in de maand — geheel aan zichzelf over te laten. Alle voordelen van het één-batterij-systeem komen nu ten volle tot hun recht; de zeer lange levensduur der batterij, de beschikbaarheid van vrijwel haar volledige capaciteit in geval van nood, de eenvoud

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

van de schakeling, het voortzetten van het bedrijf bij netstoring zonder omschakelmanipulaties en zonder enige onderbreking, het functionneren zonder bediening en nagenoeg zonder toezicht.

Enige speciale toepassingswijzen van conserveringsgelijkrichters

Het zal hiermee wel voldoende duidelijk geworden zijn, waarom wij het één-batterij-systeem met een conserveringsgelijkrichter van het beschreven soort als het aangewezen nood-voedingssysteem voor de meest uiteenlopende gevallen menen te mogen beschouwen. We willen nu tot slot nog enkele speciale gevallen behandelen, waarbij de conserveringsgelijkrichter telkens op enigszins andere wijze wordt gebruikt.

Een toepassing voor het telefoniebedrijf is in het aangehaalde artikel [6]) reeds uitvoerig besproken. De conserveringsgelijkrichter met de batterij diende daar voor de voeding van zg. eindcentrales in het telefoonnet. Bij deze kleine centrales, waar geen permanente bediening aanwezig is, komen de goede eigenschappen van de beschreven soort gelijkrichters ten volle tot haar recht.

Maar ook in grotere telefooncentrales, waar wèl steeds personeel aanwezig is, zijn de voordelen van het systeem nog belangrijk genoeg. Dit is gebleken bij een proefinstallatie die enige jaren geleden in gebruik werd genomen in een zg. knooppuntscentrale der Nederlandse P.T.T. Het dagelijkse verloop der belasting is bij deze centrales iets anders dan bij de eindcentrales; ook is er een zekere permanente (rust-)belasting, veroorzaakt door de tel-apparatuur voor de interlocale gesprekken. Voor de werking van de gelijkrichter en de batterij maakt dit echter geen essentieel verschil.

Bij deze installatie was een ongeveer vijf maal zo groot vermogen vereist als voor eindcentrales. Nu is het maken van een conserveringsgelijkrichter voor grotere vermogens een iets moeilijker probleem dan het opvoeren van het vermogen bij normale gelijkrichters. Ten gevolge van de hoge verzadiging van de transformatorkern zijn nl. de ijzerverliezen bij een conserveringsgelijkrichter van het beschreven type groter dan normaal, met andere woorden de optredende verwarming doet zich al bij kleinere transformatorvolumes hinderlijk gevoelen. Om deze reden is het voor grotere vermogens het meest economisch de levering van het totale vermogen niet aan een conserveringsgelijkrichter alleen toe te vertrouwen maar aan de serieschakeling van zulk een gelijkrichter met een gewone gelijkrichter. Dit heeft bovendien het voordeel dat de invloed van netspanningsschommelingen nog sterker kan worden beperkt. Immers, in fig. 6 ziet men, dat de uitgangsspanning van het beschreven type conserveringsgelijkrichter met dalende netspanning stijgt, terwijl de uitgangsspanning van een normale gelijkrichter met dalende netspanning daalt. Bij een serieschakeling kunnen de twee effecten elkaar voor een deel opheffen. Bij de genoemde installatie voor een knooppuntscentrale werd hiervan gebruik gemaakt. Het benodigde vermogen (15 A, 60 V) wordt voor $^3/_4$ door een conserveringsgelijkrichter, voor $^1/_4$ door een gewone gelijkrichter geleverd. In *fig. 7* is de schakeling geschetst, waarmee thans reeds verschillende knooppuntscentrales zijn uitgerust. Bij een netspanningsvariatie van 10% blijkt de verkregen gelijkspanning slechts met 1% te variëren.

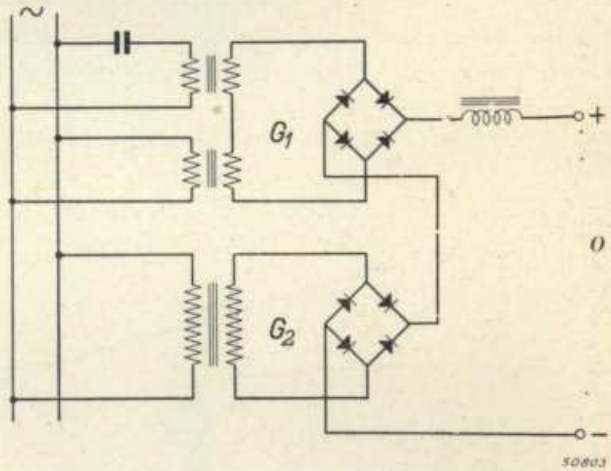

Fig. 7. Serieschakeling van een conserveringsgelijkrichter G_1 en een gewone gelijkrichter G_2. Een dergelijke schakeling wordt gebruikt voor de voeding van een aantal knooppuntscentrales der Nederlandse P.T.T.

In *fig. 8* zijn de karakteristieken van de beide gelijkrichters, bij gebruik van elk afzonderlijk, weergegeven, alsmede de resulterende karakteristiek bij de serieschakeling. Merkwaardig is, dat de

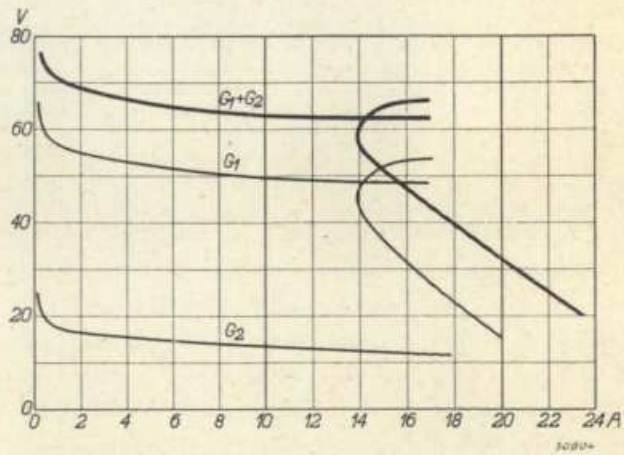

Fig. 8. Karakteristieken der beide gelijkrichters van fig. 7, elk afzonderlijk genomen: G_1, G_2; resulterende karakteristiek van de serieschakeling der beide gelijkrichters: $G_1 + G_2$.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

resulterende karakteristiek, ondanks de sterke helling van de karakteristiek G_2, niet in merkbare mate steiler dan G_1 blijkt te verlopen. De invloed van belastingsvariaties op de uitgangsspanning is dus bij de serieschakeling niet groter dan bij de conserveringsgelijkrichter alleen. Dat dit mogelijk is, ziet men in wanneer men bedenkt, dat de ogenblikken van het open- en dichtgaan der ventielen voor de twee in serie staande gelijkrichters niet onderling onafhankelijk zijn. Men mag derhalve niet eenvoudig voor elke abscis (stroomsterkte) de ordinaten der beide karakteristieken bij elkaar optellen. (De theoretische afleiding van het werkelijke verloop der resulterende karakteristiek biedt grote moeilijkheden.)

Een enigszins afwijkende wijze van samenwerken tussen een gewone en een conserveringsgelijkrichter verkrijgt men indien men deze parallel schakelt. Een dergelijke schakeling werd bijv. toegepast voor de voeding van een stel magnetische netschakelaars in een verdeelstation van het electrische net der

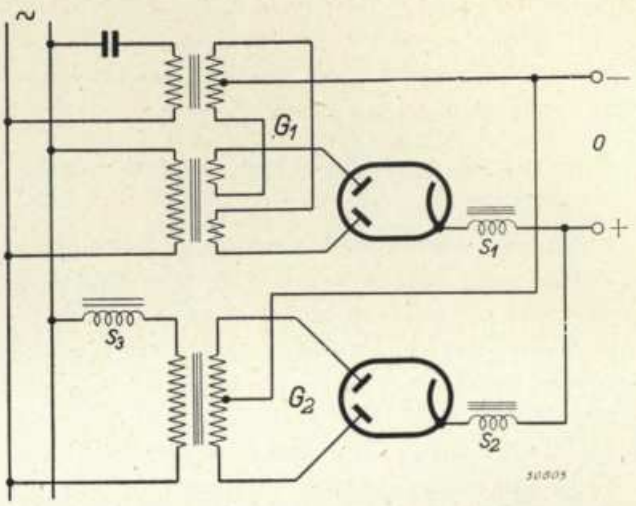

Fig. 9. Parallelschakeling van een conserveringsgelijkrichter G_1 en een gewone gelijkrichter G_2. Voor het speciale geval waarin wij deze schakeling hebben toegepast, was het gewenst gelijkrichtbuizen in plaats van seleenventielen te gebruiken. S_1, S_2 smoorspoelen. S_3 is een instelbare smoorspoel, waardoor het vlakke gedeelte van de resulterende karakteristiek (zie $G_1 + G_2$ in fig. 10) naar het gewenste stroomsterktegebied verschoven kan worden.

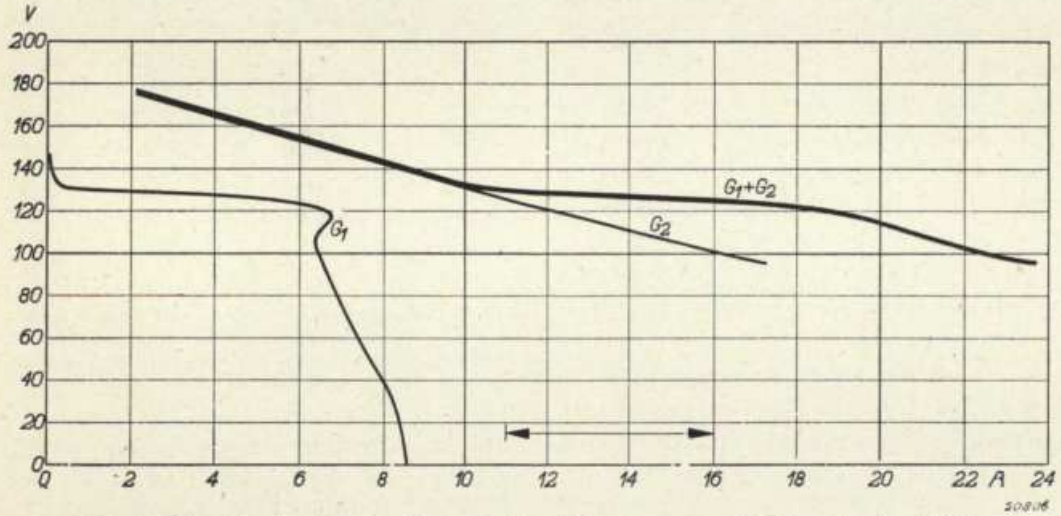

Fig. 10. Karakteristieken G_1, G_2 der beide gelijkrichters van fig. 9, elk afzonderlijk genomen. Doordat de inwendige weerstand van een buis anders met de stroom verloopt dan die van een seleenventiel, wijkt de karakteristiek G_1 enigszins af van die in fig. 5; er is wel een vlakke en een steile tak, deze gaan echter zonder elkaar te snijden in elkaar over. $G_1 + G_2$ is de resulterende karakteristiek van de parallelschakeling der beide gelijkrichters. In een beperkt stroomsterktegebied (op de abscis aangeduid) is de spanning zeer goed constant, terwijl toch slechts een relatief klein gedeelte van het vermogen door de conserveringsgelijkrichter moet worden geleverd.

Philips-fabrieken. In *fig. 9* is de schakeling getekend, *fig. 10* geeft de afzonderlijke karakteristieken van de beide gelijkrichters, alsmede de resulterende karakteristiek van de parallelschakeling. Daar de uitgangsspanningen hier identiek zijn, gedragen zich de beide gelijkrichters in dit geval wèl onafhankelijk van elkaar en de resulterende karakteristiek wordt eenvoudig verkregen door voor elke ordinaat de twee abscissen op te tellen. Men ziet nu dat de resulterende karakteristiek over het geheel vrij sterk helt, maar in een klein gebied nagenoeg horizontaal loopt. Bij de genoemde toepassing was het slechts om een dergelijk klein gebied van stroomsterkten begonnen, en de beschreven schakeling had dan het voordeel dat het horizontale verloop der karakteristiek in dat gebiedje reeds met een heel kleine en dus weinig kostbare conserveringsgelijkrichter kon worden verkregen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

HALFGELEIDERS MET EEN GROTE NEGATIEVE TEMPERATUUR-COËFFICIENT VAN DE WEERSTAND

621.315.59:537.312.6:548.7

door E. J. W. VERWEY, P. W. HAAYMAN en F. C. ROMEYN.

Wegens de toenemende belangstelling van de electrotechniek voor weerstandsmaterialen met een grote, negatieve temperatuurcoëfficient van de weerstand, zijn in de Philips-Laboratoria materialen met deze eigenschap ontwikkeld. Deze materialen zijn mengkristallen van Fe_3O_4 met bepaalde stoffen die dezelfde kristalstructuur hebben als Fe_3O_4, de zg. spinelstructuur. Zij bieden belangrijke voordelen vergeleken met de tot dusver voor hetzelfde doel gebruikte materialen. In de eerste plaats zijn zij veel beter reproduceerbaar bij de bereiding: de weerstandswaarde is uitsluitend bepaald door de mengverhouding van Fe_3O_4 en de andere component. In de tweede plaats zijn de electrische eigenschappen (de waarde van de weerstand en die van de temperatuurcoëfficient) van de daaruit gemaakte weerstanden, hier temco-weerstanden genoemd, veel beter constant bij het gebruik: een temco-weerstand kan voor de meeste toepassingen zonder speciale voorzorgsmaatregelen in lucht worden gebruikt, zelfs bij een temperatuur van enkele honderden graden Celsius.
In het artikel worden de toepassingsmogelijkheden der weerstanden besproken, en de physico-chemische achtergrond der ontwikkeling van deze nieuwe materialen.

Inleiding

Halfgeleiders zijn vaste stoffen waarvan de soortelijke weerstand aanzienlijk groter is dan die van metalen. Het geleidingsmechanisme bij de halfgeleiders kan nog tweeërlei zijn: het kan berusten op de beweging van ionen (electrolytische geleiding) of van electronen (electronengeleiding). Slechts de laatstgenoemde soort van halfgeleiders vindt practische toepassing als weerstandsmateriaal, omdat de electrolytische geleiding gepaard gaat met chemische veranderingen en polarisatieverschijnselen, die als storend worden ondervonden. Daarom zullen wij in dit artikel met „halfgeleiders" altijd de electronen-halfgeleiders bedoelen.

Hoewel de geleiding bij deze halfgeleiders evenals bij de metalen haar oorzaak vindt in de beweging van electronen, is het mechanisme van het verschijnsel hier essentieel anders dan bij de metalen. Dit komt tot uiting o.a. in het feit, dat de specifieke weerstand van deze halfgeleiders met stijging van de temperatuur afneemt, terwijl het bij de metalen andersom is. Het blijkt nl. dat het verband tussen de specifieke weerstand ϱ van de halfgeleiders en de absolute temperatuur T met goede benadering door de formule

$$\varrho = \varrho_\infty e^{b/T} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

kan worden voorgesteld, waarbij ϱ_∞ en b positieve temperatuuronafhankelijke constanten zijn. De temperatuurcoëfficient α van de weerstand is dus:

$$\alpha = \frac{1}{\varrho}\frac{d\varrho}{dT} = -\frac{b}{T^2}, \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

dwz. inderdaad negatief.

Het is duidelijk dat voor electrische schakelingen een weerstand met een negatieve temperatuurcoëfficient (afkorting: t.c.) bepaalde voordelige mogelijkheden biedt. Daarom ook is het belang van de halfgeleiders voor de electrotechniek groot. Toch bleek de toepassing van de halfgeleiders vaak minder gunstig te zijn dan men zou verwachten. Dit staat in verband met het feit dat de electrische eigenschappen, nl. de waarde van de weerstand en van de t.c., van bijna alle tot nu toe gebruikte halfgeleiders tijdens het gebruik aanzienlijk veranderen; bovendien is het bij de bereiding van de halfgeleiders meestal moeilijk geweest volkomen reproduceerbare resultaten te verkrijgen.

In de Philips-Laboratoria zijn echter in de laatste jaren halfgeleiders met een grote negatieve t.c. ontwikkeld waarbij deze beide bezwaren zich aanzienlijk minder doen gevoelen. Deze halfgeleiders zijn mengkristallen van de verbinding Fe_3O_4 met bepaalde stoffen die aan de algemene chemische formule XY_2O_4 voldoen. Essentieel is daarbij dat deze stoffen dezelfde kristalstructuur bezitten als Fe_3O_4 (deze chemische formule kan ook als $FeFe_2O_4$ worden geschreven) en wel de zg. spinelstructuur. De uit deze halfgeleiders vervaardigde weerstanden zullen wij hier temco-weerstanden noemen. De eigenschappen der temco-weerstanden zijn behoorlijk stabiel, zodat men deze weerstanden zonder speciale voorzorgsmaatregelen in lucht kan gebruiken, zelfs bij een temperatuur van enkele honderden graden C. Zij zijn ook goed reproduceerbaar: men kan bij de bereiding van het materiaal der temco-weerstanden de gewenste waarde van de weerstand gemakkelijk verkrijgen door geschikte keuze van de mengverhouding van Fe_3O_4 en van de andere component.

Er dient hier al direct opgemerkt te worden dat de toepassing der temco-weerstanden niet beperkt is tot de gevallen waarin men stoffen met een negatieve t.c. nodig heeft. Het blijkt nl. dat de absolute waarde van de t.c. der temco-weerstanden bij kamer-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

temperatuur een factor 10 groter is dan die van de metalen. Is dus de werkwijze van een of ander instrument gebaseerd op de veranderlijkheid van de weerstand met de temperatuur en speelt daarbij het teken van de t.c. geen essentiële rol, dan zal men vaak de gevoeligheid van het instrument gemakkelijk kunnen opvoeren door niet een metallische weerstand doch een temco-weerstand te gebruiken.

De toepassingsmogelijkheden van de temco-weerstanden zullen in het thans volgende hoofdstuk van dit artikel uitvoeriger worden besproken. Vervolgens willen we de physico-chemische achtergrond van de ontwikkeling der temco-weerstanden schetsen. Dit zullen we doen in aansluiting op twee artikelen die onlangs in dit tijdschrift zijn verschenen: het ene over de electronengeleiding in halfgeleiders [1]) en het andere over stoffen met de spinelstructuur [2]). Het zal blijken dat de goede stabiliteit en reproduceerbaarheid van de electrische eigenschappen der temco-weerstanden goed te begrijpen zijn op grond van het geleidingsmechanisme der halfgeleiders (dat o.a. in verg. (1) tot uiting komt) en van de bijzonderheden van de spinelstructuur.

Toepassingsmogelijkheden der temco-weerstanden

De toepassingen der temco-weerstanden kan men blijkens het vorenstaande in twee groepen verdelen: een groep waarbij het negatieve teken van de t.c. essentieel is, en een groep waarbij slechts de grote absolute waarde van de t.c. van belang is.

Toepassingen waarbij het negatieve teken van de t.c. essentieel is

Bij deze toepassingen kan men nog tussen twee gevallen onderscheiden. In het eerste geval maakt men nuttig gebruik van het feit dat het enige tijd kost voordat de stroom de temco-weerstand opwarmt en een evenwicht tussen de toegevoerde electrische energie (Joule-warmte) en de door convectie, geleiding en straling afgevoerde warmte is bereikt. In het tweede geval gebruikt men de temco-weerstand in de evenwichtstoestand; daarbij neemt men dus de traagheid van het verschijnsel op de koop toe, of tracht deze door speciale maatregelen te verminderen.

Een typisch voorbeeld van de eerste soort toepassingen ontlenen wij aan de radiotechniek. Bij de radiobuizen met een indirect verhitte kathode duurt het enige tijd aleer de kathode haar eindtemperatuur heeft bereikt. Daar de t.c. van de verhittingsdraden (meestal uit wolfraam) positief is, is de weerstand van deze draden bij het inschakelen van de stroom lager dan in de eindtoestand. Zijn de verhittingsdraden in serie verbonden met andere onderdelen van de beschouwde schakeling, dan kan het dus gebeuren dat bij het inschakelen een aanzienlijk grotere spanning over deze onderdelen komt te staan dan tijdens het gebruik. Dit kan weer noodlottige gevolgen hebben voor de bedoelde onderdelen. Men kan deze moeilijkheid nu op eenvoudige wijze omzeilen door een temco-weerstand in serie met de verhittingsdraden te schakelen. De weerstandswaarde en de dimensies van de temco-weerstand kunnen nl. gemakkelijk zodanig worden gekozen dat bij de begintemperatuur de gevaarlijke extra-spanning practisch geheel over de temco-weerstand staat en dat deze laatste — dank zij zijn grote negatieve t.c. — zichzelf bijna volledig uitschakelt bij de hogere eindtemperatuur van de weerstand. Het principe van deze toepassing der temco-weerstanden is natuurlijk niet beperkt tot radio-apparaten, maar kan ook bijv. voor het verlagen van inschakelstroompieken bij motoren worden gebruikt.

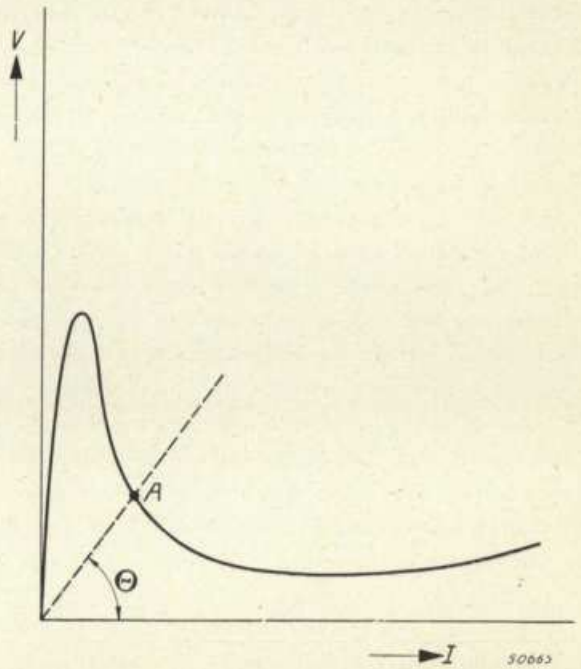

Fig. 1. De spanning V over een temco-weerstand als functie van de stroomsterkte I (kwalitatief). Bij een bepaalde waarde van I is de waarde van de weerstand gegeven door $\mathrm{tg}\,\Theta$.

Voor de tweede soort van toepassingen moeten wij de stroom-spanning-karakteristiek der temco-weerstanden in de stationnaire toestand nader beschouwen. Deze is schematisch weergegeven in *fig. 1*. De spanning V over de weerstand is hier als functie van de door de weerstand gevoerde stroom I weergegeven. Bij een bepaalde stroom is de waarde

[1]) Philips techn. T. **9**, 47-54, 1947 (No. 2).
[2]) Philips techn. T. **9**, 186-192, 1947 (No. 6).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

R van de weerstand gegeven door de tangens van de hoek Θ tussen de horizontale as en de lijn die het „werkpunt" A met de oorsprong verbindt. Hoe groter de stroomsterkte, hoe hoger ook de temperatuur van de weerstand en, wegens het negatieve teken van de t.c., hoe kleiner de waarde van de weerstand. De afneming van de weerstand met de toeneming van de stroomsterkte is daarbij des te langzamer naarmate de stroomsterkte groter wordt.

De merkwaardige vorm van de karakteristiek kan worden begrepen uitgaande van de overweging dat in de evenwichtstoestand de in de weerstand ontwikkelde Joule-warmte gelijk moet zijn aan de naar buiten afgevoerde warmte. De preciese vorm van de karakteristieken zal dus niet alleen afhangen van de electrische eigenschappen van de temco-weerstand, maar ook van de wijze waarop de warmte-uitwisseling met de omgeving geschiedt. Dientengevolge zal een temco-weerstand zich in vacuum anders gedragen dan in een of ander gas.

Men kan nu verschillende gedeelten van deze karakteristiek in electrische schakelingen gebruiken. In de eerste plaats valt het op, dat de spanning over een groot gedeelte van de kromme weinig varieert met de stroomsterkte, en wel in het gedeelte dat overeenkomt met de hoge belastingen. Men kan dus deze soort weerstanden gebruiken als spanningsstabilisatoren.

In de tweede plaats heeft de kromme een gedeelte met een negatieve helling. Hiermee correspondeert dus een negatieve differentiaalweerstand dV/dI. Daar de negatieve differentiaalweerstanden, zoals bekend is, een rol bij de opwekking van electrische trillingen spelen, is daardoor ook aan de temco-weerstanden een toepassingsgebied geopend, althans bij lage frequenties.

De combinatie van een gewone, temperatuur-„onafhankelijke" weerstand en een temco-weerstand in serie levert in een bepaald gebied van de V-I-karakteristiek weer een horizontale rechte lijn, zoals uit *fig. 2* blijkt. Ook een dergelijke combinatie van weerstanden is dus voor de spanningsstabilisatie te gebruiken. Zij heeft in vele gevallen nog voordelen boven het gebruik van het vlakke deel van de karakteristiek van de temco-weerstand zelf: het horizontale gedeelte van de karakteristiek ligt nu bij een veel kleinere waarde van de stroomsterkte; het maximum ontbreekt, dat eerst moest worden overschreden alvorens de toestand overeenkomende met het horizontale gedeelte van de karakteristiek werd bereikt.

Een temco-weerstand zal bij al deze toepassingen des te sneller de evenwichtstoestand bereiken en de wisselingen van de spanning of van de stroom volgen naarmate: (a) de warmtecapaciteit van de weerstand geringer is; (b) de warmte-uitwisseling met de omgeving sneller plaats vindt. In verband met (a) kan men deze weerstanden in de vorm van zeer dunne draden brengen. Dit bereikt men door toepassing van de in de keramiek bekende me-

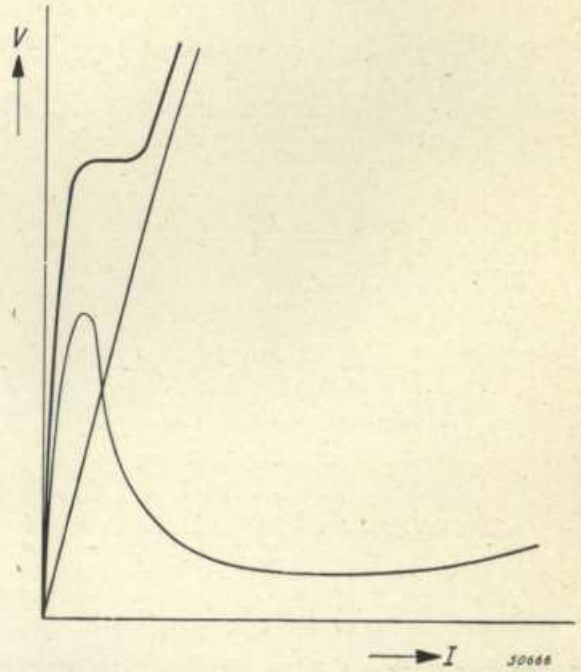

Fig. 2. De spanning V over een weerstand, samengesteld uit een temco-weerstand en een metallische weerstand in serie, als functie van de stroomsterkte I (kwalitatief).

thoden, bijv. het spuiten van de keramische massa met een geschikte binder, gevolgd door stoken van de draden in hangende positie. Wat (b) betreft, dit kan worden verwezenlijkt door de weerstand aan te brengen in een buisje met een gas bestaande uit zeer lichte moleculen (bijv. helium).

Tot de hier besproken groep van toepassingen behoort ook het maken van een weerstand, die in een bepaald temperatuurgebied onafhankelijk is van de omgevingstemperatuur. Dit bereikt men wederom door een geschikt gedimensionneerde temco-weerstand in serie met een metallische weerstand te schakelen.

Toepassingen waarbij de grote absolute waarde van de t.c. van belang is

Zoals reeds in de inleiding is vermeld, doelen wij hier op de toepassing der temco-weerstanden in allerlei instrumenten, waarvan de werking gebaseerd is op het van nul verschillend zijn van de t.c. en waarbij het teken van de t.c. in principe onverschillig is. Hiervoor gebruikte men tot nu toe meestal metallische, temperatuurafhankelijke weerstanden. Men denke bijv. aan weerstandsthermometers of bolometers. De gevoeligheid van dergelijke instru-

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

menten is des te groter naarmate de absolute waarde van de t.c. groter is.

Nu is de specifieke weerstand ϱ_{met} van metalen, bij niet te lage temperatuur, ongeveer evenredig met de absolute temperatuur T:

$$\varrho_{met} = \text{const. } T.$$

Hieruit volgt dat de t.c. van ϱ_{met} practisch onafhankelijk is van de waarde van ϱ_{met}. Met andere woorden: de t.c. heeft voor alle metalen ongeveer dezelfde waarde

$$\alpha_{met} = \frac{1}{\varrho_{met}} \frac{d\varrho_{met}}{dT} = \frac{1}{T},$$

dwz. bij kamertemperatuur, $T = 300°$, $\alpha_{met} = 0{,}33\%$.

Geheel anders is de situatie bij de halfgeleiders. Hier is α wel afhankelijk van de waarde van de specifieke weerstand. Immers, uit verg. (1) en (2) volgt:

$$\alpha = \frac{\log \varrho_\infty - \log \varrho}{T}.$$

Een specifieke weerstand van 10^5 Ω cm is uit meettechnisch oogpunt geschikt; neemt men verder aan dat $\varrho_\infty = 10^{-2}$ Ω cm (een nog lagere waarde van ϱ_∞ is trouwens ook niet moeilijk te bereiken), dan vindt men met behulp van de laatste formule:

$$\alpha = \frac{-2-5}{T} (\log 10) \approx -\frac{16}{T},$$

Voor een temco-weerstand waarvoor $\varrho = 10^5$ Ω cm bij kamertemperatuur is, volgt hieruit: $\alpha \approx 5\%$.

De superioriteit van de temco-weerstanden vergeleken met de metallische weerstanden is dus duidelijk. Daarbij heeft men nog niet eens in rekening gebracht dat de grote waarde van de specifieke weerstand al op zichzelf een voordeel is bij de weerstandsthermometrie.

Infrarode stralen met grote golflengte kan men niet meer aantonen met behulp van fotogeleiding, foto-electrische emissie of fotografische methoden, aangezien de daarbij behorende energie-quanta te gering worden. Men is dan op bolometers aangewezen. Voor bolometers kan men temco-weerstanden maken in de vorm van dunne vliesjes, aan weerszijden voorzien van een metallisch contact. De grootte van het oppervlak zal men daarbij in het algemeen zodanig kiezen dat de stralingsbundel juist het gehele vliesje bestraalt. De vliesjes moeten zeer dun zijn omdat dan hun warmtecapaciteit zeer klein wordt, hetgeen voor de insteltijd van het instrument gunstig is.

Voor de energie-meting bij nog grotere golflengten, nl. in het gebied van radiogolven van zeer hoge frequentie (centimetergolven) zijn de temco-weerstanden ook geschikt. Men past dit soort weerstanden dan toe in de vorm van zeer kleine bolletjes (speldeknop), waarbij twee ingebakken zeer dunne metaaldraadjes als contacten dienst doen.

Bij al deze toepassingen der temco-weerstanden stuurt men door de weerstand een meetstroom, die zo zwak is, dat de temperatuur van de weerstand daardoor niet meetbaar verandert. De waarde van de weerstand wordt dus hier practisch uitsluitend bepaald door de van buiten toegevoerde energie (in de vorm van warmte- of stralingsenergie); dit in tegenstelling tot het geval van de eerder besproken eerste groep toepassingen, waarbij de evenwichtstemperatuur van de weerstand, en dus ook de waarde van deze laatste, afhankelijk waren van de Joule-warmte van de stroom.

Een andere toepassingsmogelijkheid, die ook bij deze groep behoort, is het geval dat de temperatuur, en daardoor de weerstandswaarde van een temco-weerstand, geregeld wordt door een uitwendige verwarmingsstroom. Men kan op deze wijze de stroom in de ene kring continu besturen met behulp van de stroom in een andere kring, terwijl beide kringen toch onderling electrisch volledig zijn gescheiden. Men kan daartoe bijv. een temco-weerstand in de vorm van een dun staafje omringen met een spiraalvormig gewikkelde metaaldraad, zodanig, dat over de gehele lengte een geringe afstand tussen beide geleiders gehandhaafd blijft, en het geheel met toevoerdraden aanbrengen in een met een indifferent gas gevulde of geëvacueerde buis.

Tot slot van dit overzicht der toepassingsmogelijkheden van de temco-weerstanden willen wij nog vermelden dat deze weerstanden, behalve in de reeds genoemde vormen (dunne draden, vliesjes, bolletjes), ook in de vorm van staafjes, plaatjes, buisjes enz. gemaakt kunnen worden.

De physico-chemische achtergrond van de ontwikkeling der temco-weerstanden

Temperatuur-afhankelijkheid van de weerstand bij halfgeleiders

In een goede geleider — bijv. een metaal — zijn de geleidingselectronen min of meer vrij. Bij temperatuurstijging blijft het aantal vrije electronen onveranderd. De electrische weerstand neemt echter toe, doordat bij hogere temperatuur de electronen door de sterkere temperatuurbeweging van de atomen in grotere mate worden verstrooid en geremd.

In de halfgeleiders is de situatie geheel anders.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Bij lage temperatuur bevat de stof hier geen vrije electronen. In een vorig, hierboven aangehaald artikel (zie noot [1])) hebben wij echter gezien, dat men hetzij door het toevoeren van optische energie, hetzij van thermische energie, de electronen in een toestand kan brengen waarin zij zich wel min of meer vrij door het kristalrooster kunnen bewegen. Is het hiervoor nodige energiebedrag klein, zijn dus de electronen „zwak gebonden", dan kan het gebeuren dat de stof reeds bij kamertemperatuur een aanzienlijk geleidingsvermogen heeft. In ieder geval neemt het aantal electronen dat door de thermische energie wordt vrij gemaakt snel met de temperatuur toe. Dit effect overtreft in het algemeen verre het ook hier optredende effect van de toenemende verstrooiing en remming der electronen. Het resultaat is dus dat de electrische weerstand met stijgende temperatuur snel daalt; met andere woorden: de temperatuurcoëfficient van de weerstand is negatief.

Het verband (1) tussen de waarde van de weerstand en de temperatuur komt nu ruw gesproken als volgt tot stand. Laat ons onderstellen, dat er N plaatsen in het kristalrooster zijn waarin zich zwak gebonden electronen bevinden, en dat er een energie ε, de zg. activeringsenergie, nodig is om zulk een electron in de min of meer vrije toestand te brengen. Bij de absolute temperatuur T zullen zich nu gemiddeld n van de N electronen in de min of meer vrije toestand bevinden, dwz. er zullen op n van de genoemde N plaatsen „gaten" zijn. In het thermodynamisch evenwicht moet dan de relatie gelden:

$$\frac{n \cdot n}{N-n} = \text{const. } e^{-\varepsilon/kT},$$

waarin k de constante van Boltzmann is [3]). Daar n veel kleiner is dan N, kunnen wij in plaats van deze formule ook schrijven:

$$n = \text{const. } \sqrt{N}\, e^{-\varepsilon/2kT}.$$

Het specifieke geleidingsvermogen is nu gelijk aan het product van de beweeglijkheid der electronen in de min of meer vrije toestand en van n, indien dit laatste aantal per kubieke centimeter is genomen. Daar de beweeglijkheid practisch onafhankelijk van de temperatuur is, krijgt men ten slotte voor de temperatuurafhankelijkheid van de specifieke weerstand inderdaad een formule van de vorm (1), waarbij $b = \varepsilon/2k$ is:

$$\varrho = \text{const. } e^{\varepsilon/2kT} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

[3]) Bij een exactere afleiding van deze formule blijkt dat de factor, waarmee de exponentiële functie vermenigvuldigd is, zwak temperatuurafhankelijk is.

Temperatuurafhankelijkheid van de weerstand van Fe_3O_4

Na deze inleidende beschouwingen gaan wij nu over tot de bespreking van de halfgeleiders waaruit de temco-weerstanden zijn gemaakt. Het uitgangspunt is hier, zoals in de inleiding reeds werd vermeld, de verbinding Fe_3O_4, in minerale vorm bekend onder de naam magnetiet, en ook wel ferro-ferriet genoemd, omdat het kan worden opgevat als een ferriet MFe_2O_4, waarin tweewaardig ijzer de rol van het metaal M vervult. Deze stof is een betrekkelijk goede electronengeleider, in vergelijking met andere oxydische halfgeleiders zelfs een zeer goede geleider: haar specifieke weerstand bij kamertemperatuur bedraagt $5 \cdot 10^{-3}\ \Omega$ cm, dus slechts enkele honderden malen de specifieke weerstand van de metalen. Toch is Fe_3O_4 wel een halfgeleider, in die zin, dat deze stof in een groot temperatuurgebied bij benadering aan de wet (1) voldoet. Dit wordt gedemonstreerd door *fig. 3*, die de logarithme van

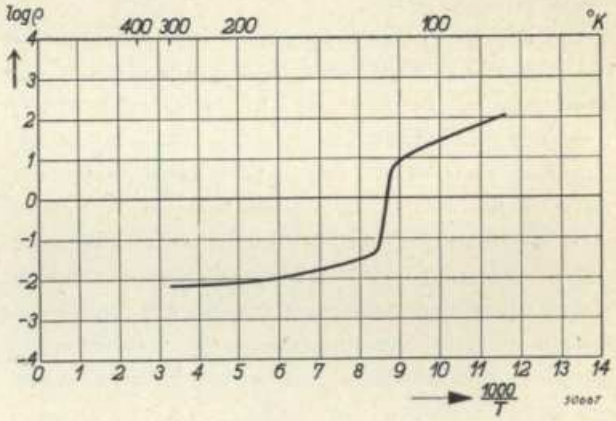

Fig. 3. De logarithme van de specifieke weerstand ϱ (in Ω cm) als functie van $1/T$, waarbij T de absolute temperatuur is, voor Fe_3O_4.

de specifieke weerstand ϱ van Fe_3O_4 als functie van $1/T$ weergeeft (in deze figuur neemt de temperatuur dus van rechts naar links toe). Wij beschouwen eerst het gedeelte van de kromme, dat tussen ongeveer 130 °K en 200 °K gelegen is. De weerstand neemt hier bij verlaging van de temperatuur toe; de kromme benadert een rechte lijn. Dit is in overeenstemming met verg. (1): immers, uit deze vergelijking volgt:

$$\log \varrho = -\frac{b}{T} + \log \varrho_\infty; \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

$\log \varrho$ is dus inderdaad een lineaire functie van $1/T$. Verder zien wij in de figuur dat de helling van dit nagenoeg rechtlijnige stuk van de kromme zwak is. In het temperatuurgebied waarvoor $T > 200$ °K, loopt de kromme bijna horizontaal; voor $T > 300$ °K (dit gedeelte van de kromme is in de figuur niet

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

getekend) wordt de t.c. zelfs positief. Blijkbaar krijgt het metallische effect, nl. de toenemende verstrooiing en remming der electronen, hier de overhand; bovendien is n vermoedelijk niet meer klein vergeleken met N (vgl. de afleiding van verg. (3)).

In het rechtergedeelte van de figuur, dwz. bij zeer lage temperatuur, treedt een bijzonder verschijnsel op, dat in tegenstelling tot de hiervóór besproken gedragingen van Fe_3O_4 alleen bij deze stof is waargenomen [4]). Bij ongeveer 130 °K neemt nl. de weerstand bij verdere temperatuurverlaging plotseling met een grote sprong toe. Tegelijk neemt ook de helling van de kromme, dwz. de t.c., discontinu toe. Een nadere discussie van de aard van dit overgangspunt zou ons echter te ver voeren (zie hiervoor het in noot [4]) aangehaalde artikel). Hier willen wij nog slechts toevoegen, dat het overgangspunt verdwijnt, zodra Fe_3O_4 een kleine hoeveelheid (minder dan 1%) van een ander spinel — dit is een afkorting voor „stof met de spinelstructuur" — bevat.

Uit het bovenstaande is het direct duidelijk dat de verbinding Fe_3O_4 zelf in het algemeen [5]) niet bruikbaar is voor de in dit artikel beschreven toepassingen. Immers, zowel de specifieke weerstand van Fe_3O_4 als de t.c. zijn veel te klein hiervoor [6]). Toch blijkt Fe_3O_4 een geschikte basis te vormen voor de bereiding van bruikbare weerstandsmaterialen. Om nu de bij de ontwikkeling der temcoweerstanden gevolgde weg begrijpelijk te maken, moeten we wat nader ingaan op de verklaring van het voor halfgeleiders ongewoon grote specifieke geleidingsvermogen van Fe_3O_4.

Samenhang tussen de electronengeleiding en de spinelstructuur van Fe_3O_4

De verklaring van het grote specifieke geleidingsvermogen van Fe_3O_4 hangt nauw samen met een bijzondere eigenschap van de spinelstructuur van deze stof. Over de spinelstructuur is reeds in een voorgaand artikel in dit tijdschrift uitvoerig gesproken (zie noot [2])). Daar hebben wij gezien, dat in de spinelstructuur de metaalatomen of -ionen [7]) nog op zijn minst op twee manieren kunnen worden gerangschikt. Er zijn nl. twee soorten van plaatsen bij deze kristalstructuur voor de metaalionen beschikbaar, en wel, per „molecuul", één zg. tetraëderholte en twee zg. octaëderholten. Hebben wij nu bijv. te maken met een spinel met de chemische formule $M^{2+}M_2^{3+}O_4$, waarin M^{2+} en M^{3+} resp. een twee- en driewaardig metaal aanduiden, dan zijn de twee bovenbedoelde manieren, waarop de metaalionen de beschikbare holten kunnen bezetten, als volgt. Bij het ene structuurtype zijn de tetraëderholten uitsluitend door M^{2+} bezet en de octaëderholten uitsluitend door M^{3+}. Bij het tweede structuurtype bevinden zich alle M^{2+} in octaëderholten; van de M^{3+}-ionen bevindt zich daarentegen een helft in octaëderholten en de andere helft in de tetraëderholten; de verdeling van de M^{2+}- en M^{3+}-ionen over de octaëderholten is daarbij volkomen onregelmatig. Het eerste structuurtype duiden wij aan met $M^{2+}(M_2^{3+})O_4$; het tweede met $M^{3+}(M^{2+}M^{3+})O_4$; tussen haakjes zijn dus telkens de symbolen van de ionen gezet, die zich in de octaëderholten bevinden. Er zijn ook spinellen met de chemische formule $M_2^{2+}M^{4+}O_4$; hierbij zijn ook twee dergelijke structuurtypen mogelijk.

In het genoemde artikel hebben wij verder gezien, dat het röntgenografisch niet direct uit te maken is tot welk structuurtype het Fe_3O_4 behoort. Wij hebben daar echter een aantal „regels" afgeleid die het mogelijk maken voor een bepaalde stof met spinelstructuur de rangschikking der metaalionen met grote waarschijnlijkheid te voorspellen. De bedoelde regels luiden (in enigszins verkorte vorm):

1) De drie- en vierwaardige metaalionen bezetten de octaëderholten.
2) Uitzondering zijn Fe^{3+}-ionen, welke bij voorkeur de tetraëderholten bezetten.
3) Zn^{2+}- en Cd^{2+}-ionen zijn in staat de Fe^{3+}-ionen uit de tetraëderholten te verdrijven.

Volgens deze regels zal dus Fe_3O_4 een structuur van het tweede type moeten hebben, $Fe^{3+}(Fe^{2+}Fe^{3+})O_4$. Met andere woorden: Fe_3O_4 zal in de octaëderholten een „mengsel" van twee- en driewaardige ijzerionen bevatten. Hierin juist willen we een verklaring zoeken voor het ongewoon grote geleidingsvermogen van deze verbinding. Immers, indien hier over kristallografisch gelijkwaardige plaatsen inderdaad Fe^{2+} en Fe^{3+} op een onregelmatige wijze zijn verdeeld, zal de overgang van een electron van een Fe^{2+}- naar een Fe^{3+}-ion

[4]) Vgl. E. J. W. Verwey en P. W. Haayman, Physica 's-Grav. 8, 979, 1941.

[5]) In een zeer speciaal geval kan men van de grote verandering van de weerstand bij het overgangspunt gebruik maken.

[6]) Grote (negatieve) waarden van de t.c. worden zeer vaak aangetroffen bij halfgeleiders met een grote specifieke weerstand. Dat deze beide eigenschappen vaak aan elkaar gekoppeld zijn, kan worden begrepen aan de hand van verg. (2) en (4); voorzover de term $\log \varrho_\infty$ in verg. (4) verwaarloosd mag worden, zijn nl. zowel de logarithme van de specifieke weerstand als de t.c. evenredig met dezelfde grootheid b.

[7]) Inderdaad kan men hier met enig recht van metaalionen spreken, aangezien de hier bedoelde oxydische verbindingen in elk geval het ionische bindingstype enigermate benaderen en gerekend kunnen worden tot de zg. polaire verbindingen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

(waarbij dus het eerste een Fe^{3+}-ion en het tweede een Fe^{2+}-ion wordt) aan deze willekeurige verdeling weinig veranderen. Omdat voorts het electrische veld afkomstig van de omringende ionen op twee kristallografisch gelijkwaardige plaatsen gelijk is, zal ook de energie van het electron vóór en na de overgang practisch gelijk zijn. Bovendien kan deze overgang tegelijkertijd op een groot aantal plaatsen geschieden. Dit is een tamelijk ongewone situatie en de ongewoon lage waarde van de activeringsenergie van Fe_3O_4 zal wel hiermee in verband staan. Dank zij nu deze geringe activeringsenergie zijn de electronen, die de Fe^{2+}-ionen meer bevatten dan de Fe^{3+}-ionen, min of meer vrij (daar in de octaëderholten in Fe_3O_4 precies evenveel Fe^{2+}- als Fe^{3+}-ionen aanwezig zijn, zijn dit half zoveel electronen als beschikbare octaëderholten). Evenals de geleidingselectronen in een metaal zijn zij nauwelijks te localiseren en meer als behorend tot het geheel van ijzerionen in de octaëderholten te beschouwen. Zij bewegen zich voortdurend door het rooster en veroorzaken zodoende het hoge geleidingsvermogen van Fe_3O_4.

Indien het uitgangspunt (willekeurige verdeling van de Fe^{2+}- en Fe^{3+}-ionen over de octaëderholten) van deze redenering en de redenering zelf juist zijn, dan zou bij de vervanging van de Fe^{3+}-ionen in de octaëderholten door andere driewaardige ionen het geleidingsvermogen aanzienlijk moeten dalen. Dat dit zo is, konden we bevestigen door mengkristallen te maken van Fe_3O_4 met andere spinellen. Een bijzonder eenvoudig geval is bijv. dat van het mengkristal Fe_3O_4 en $FeAl_2O_4$. Mengt men deze twee verbindingen in de molverhouding 1 : 1, dan zal juist één van de twee Fe^{3+}-ionen telkens door een Al^{3+}-ion worden vervangen. Nu konden wij enerzijds voor dit mengkristal op grond van röntgènanalyse vaststellen, dat voor de Fe^{3+}-ionen in de octaëderholten Al^{3+}-ionen zijn gesubstitueerd, waaruit wij met behulp van onze regels konden afleiden dat de structuur hier van het type $Fe^{3+}(Fe^{2+}Al^{3+})O_4$ is; anderzijds vonden wij dat het specifieke geleidingsvermogen van dit mengkristal slechts 0,004 $\Omega^{-1}\,cm^{-1}$ is, terwijl dat van Fe_3O_4 200 $\Omega^{-1}cm^{-1}$ bedraagt.

Temperatuurafhankelijkheid van de weerstand der mengkristallen van Fe_3O_4 en een niet-geleidend spinel

In het licht van het bovenstaande zal het wel niet zeer verwonderlijk zijn dat men op basis van Fe_3O_4 bruikbare weerstandsmaterialen kan verkrijgen door mengkristallen te maken van Fe_3O_4 met een ander, niet geleidend, spinel. Daar spinellen in het algemeen gemakkelijk met elkander mengkristallen vormen, heeft men in principe een zeer grote keuze. Men kan bijv. een ander ferriet nemen, men kan ook spinellen gebruiken die uit geheel andere ionen zijn opgebouwd, zoals $MgAl_2O_4$, $MgCr_2O_4$, $ZnCr_2O_4$, Zn_2TiO_4, enz., eventueel een combinatie van deze spinellen. In het algemeen kan men zeggen, dat — zoals op grond van het bovenstaande te verwachten is — met toenemend gehalte aan vreemd spinel de specifieke weerstand en eveneens de t.c. toenemen.

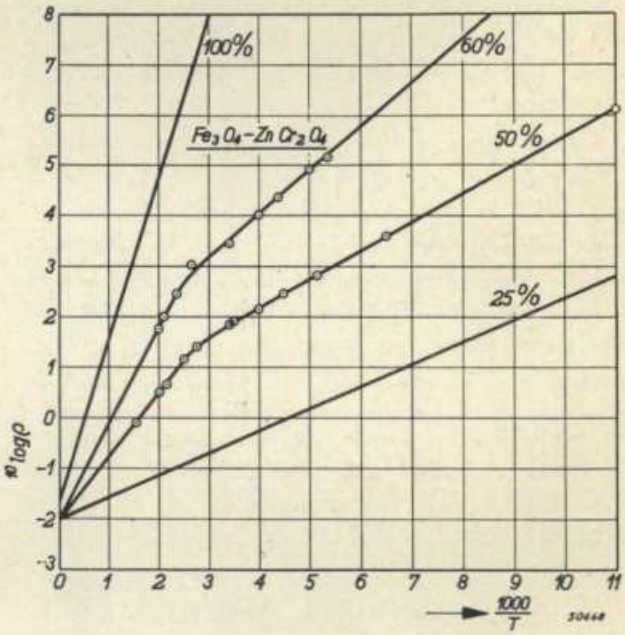

Fig. 4. De logarithme van de specifieke weerstand ϱ (in Ω cm) als functie van $1/T$ (T de absolute temperatuur) voor het mengkristal Fe_3O_4-$ZnCr_2O_4$, bij verschillende gehalten aan $ZnCr_2O_4$.

Een voorbeeld is het systeem Fe_3O_4-$ZnCr_2O_4$, waarvoor het verband tussen log ϱ en $1/T$ in *fig. 4* is weergegeven. Beschouwen wij eerst het rechter gedeelte (kamertemperatuur en lager) van de figuur, dan zien wij dat met toenemend gehalte aan $ZnCr_2O_4$ de krommen geleidelijk een grotere helling vertonen, dwz. de t.c. stijgt. Bovendien zien wij dat de weerstand bij een bepaalde temperatuur ook stijgt met toenemend gehalte aan $ZnCr_2O_4$. Dit laatste is gemakkelijk te begrijpen. Met toenemend gehalte aan $ZnCr_2O_4$ moeten namelijk op grond van onze bovengeformuleerde „regels" de aantallen van Fe^{2+}- en Fe^{3+}-ionen (die steeds aan elkaar gelijk blijven) in de octaëderplaatsen afnemen (zie *tabel I*). Daar nu de aanwezigheid van het „mengsel" van deze ionen op de kristallografisch gelijkwaardige plaatsen, zoals wij gezien hebben, essentieel is voor de lage weerstandswaarde, moet dus deze laatste met het gehalte aan $ZnCr_2O_4$ toenemen.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Tabel I. Verdeling der metaalionen over de beschikbare tetraëder- en octaëderholten in het mengkristal Fe_3O_4-$ZnCr_2O_4$ bij verschillende mengverhoudingen.

Mengverhouding $ZnCr_2O_4 : Fe_3O_4$	Tetraëderholten		Octaëderholten		
	Zn^{2+}	Fe^{3+}	Cr^{3+}	Fe^{2+}	Fe^{3+}
1/4 : 3/4	1/4	3/4	1/2	3/4	3/4
1/2 : 1/2	1/2	1/2	1	1/2	1/2
3/4 : 1/4	3/4	1/4	3/2	1/4	1/4

Het linkergedeelte van fig. 4, gedeeltelijk een extrapolatie naar $T = \infty$, vertoont bij de krommen met het hoogste gehalte aan $ZnCr_2O_4$ een plotselinge ombuiging; op de verklaring hiervan zullen we hier niet ingaan.

Aangezien de helling der log ϱ-$1/T$-krommen de t.c. bepaalt, is het van belang op te merken dat de „waaier" van deze krommen er nog zeer verschillend kan uitzien naar gelang men verschillende spinellen als niet-geleidend bestanddeel van het mengkristal gebruikt. Daarom willen we hier nog een tweede systeem, nl. Fe_3O_4-$MgCr_2O_4$, nader bespreken. *Fig. 5* geeft de log ϱ-$1/T$ krommen voor verschillende samenstellingen van dit systeem. Wij zien in de figuur dat in de buurt van de mengverhouding 1 : 1 een plotselinge toeneming van de helling der krommen optreedt, die groter is dan tussen nabijgelegen krommen bij andere mengverhoudingen. De waaier van krommen valt daardoor duidelijk in twee groepen uiteen. Dit blijkt ook uit *fig. 6*, waarin we de „activeringsenergie" ε, die volgens verg. (1), (3) en (4) evenredig is met de helling van deze krommen, als functie van de samenstelling hebben uitgezet zowel voor het systeem Fe_3O_4-$MgCr_2O_4$ als voor het systeem Fe_3O_4-$ZnCr_2O_4$.

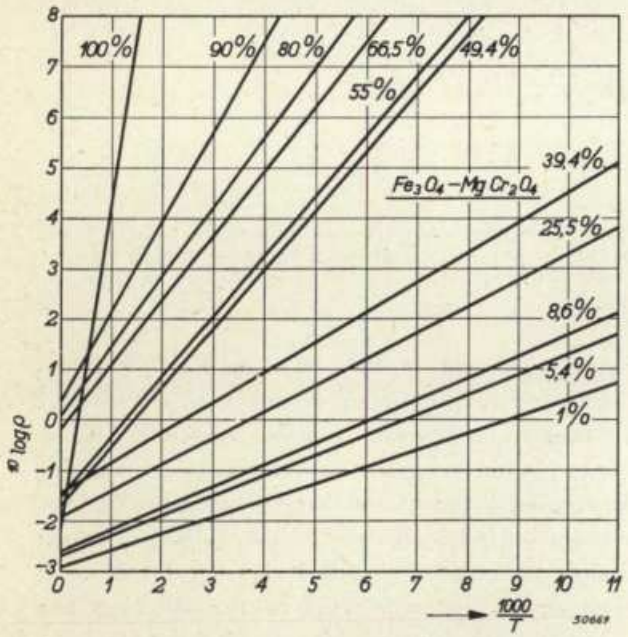

Fig. 5. De logarithme van de specifieke weerstand ϱ (in Ω cm) als functie van $1/T$ (T de absolute temperatuur) voor het mengkristal Fe_3O_4-$MgCr_2O_4$, bij verschillende gehalten aan $MgCr_2O_4$.

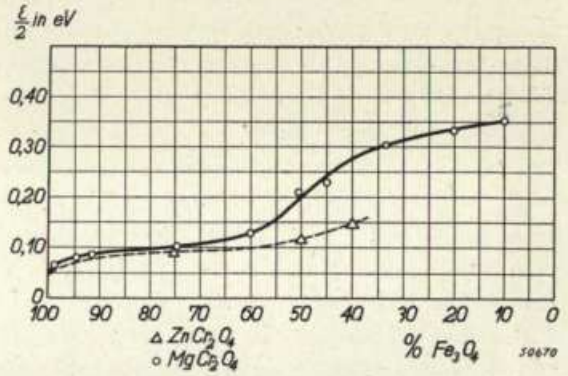

Fig. 6. De activeringsenergie ε (in eV) als functie van het percentage Fe_3O_4, voor mengkristallen Fe_3O_4-$ZnCr_2O_4$ (gestippelde lijn) en Fe_3O_4-$MgCr_2O_4$ (getrokken lijn).

Juist voordat de mengverhouding 1 : 1 wordt bereikt, blijkt de activeringsenergie voor het mengkristal Fe_3O_4-$MgCr_2O_4$ plotseling te stijgen, in tegenstelling tot het geval van Fe_3O_4-$ZnCr_2O_4$ waarvoor de activeringsenergie zeer geleidelijk toeneemt met het $ZnCr_2O_4$-percentage.

Dit gedrag van het systeem Fe_3O_4-$MgCr_2O_4$ kunnen we weer verklaren op grond van onze „regels", gecombineerd met wat wij boven gezegd hebben over het geleidingsmechanisme in Fe_3O_4. In tegenstelling tot het geval van Fe_3O_4-$ZnCr_2O_4$, waarbij men bij elke mengverhouding een zeker aantal Fe^{2+}- en Fe^{3+}-ionen in de octaëderholten aantreft, wordt hier, voor een gehalte aan $MgCr_2O_4$ gelijk aan 50% of groter, het aantal Fe^{3+}-ionen op de octaëderplaatsen nul (zie *tabel II*). Het geleidingsmechanisme, dat zo gunstig was voor een lage waarde van de weerstand, kan dan niet meer plaats vinden en is blijkbaar door een ander, minder gunstig mechanisme vervangen; vandaar de waargenomen sprong in de activeringsenergie.

Voor een gehalte aan $MgCr_2O_4$ groter dan 50%

Tabel II. Verdeling der metaalionen over de beschikbare tetraëderholten in het mengkristal Fe_3O_4-$MgCr_2O_4$ bij verschillende mengverhoudingen.

Mengverhouding $MgCr_2O_4 : Fe_3O_4$	Tetraëderholten			Octaëderholten			
	Fe^{3+}	Fe^{2+}	Mg^{2+}	Mg^{2+}	Cr^{3+}	Fe^{2+}	Fe^{3+}
1/4 : 3/4	1	0	0	1/4	1/2	3/4	1/2
1/2 : 1/2	1	0	0	1/4	1	1/2	0
3/4 : 1/4	1/2	0	1/2	1/4	3/2	1/4	0
	1/2	1/4	1/4	1/2	3/2	0	0

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

is de verdeling der metaalionen over de beschikbare holten door onze regels niet ondubbelzinnig bepaald, hetgeen ook in tabel II tot uiting komt. Het is niet onmogelijk dat dan een „mengsel" van Fe^{2+}- en Fe^{3+}-ionen zich in de tetraëderholten bevindt; deze zijn echter verder van elkaar afgelegen, zodat de situatie vermoedelijk inderdaad minder gunstig is voor een goede geleiding dan in het geval, waarin de octaëderholten dit mengsel bevatten.

Van dit abnormale gedrag van het systeem Fe_3O_4-$MgCr_2O_4$ kan men met voordeel gebruik maken, indien men bijv. een materiaal met een specifieke weerstand van 100 à 1000 Ω cm bij kamertemperatuur wenst, dat tegelijk een voor een dergelijke weerstandswaarde hoge t.c. bezit. Aan deze eis wordt nl. door mengkristallen met $MgCr_2O_4$ veel beter voldaan dan door die met $ZnCr_2O_4$, aangezien de genoemde weerstand beantwoordt aan een gehalte van 50 à 60% van het niet-geleidende spinel en bij dit gehalte de helling der krommen voor mengkristallen met $MgCr_2O_4$ relatief groot is.

Wat betreft de keuze van $MgCr_2O_4$ resp. $ZnCr_2O_4$ als niet-geleidend spinel willen we nog het volgende opmerken. Om de weerstandswaarde van het mengkristal gemakkelijk te kunnen regelen, is het wenselijk dat het geleidingsvermogen uitsluitend zijn oorzaak vindt in de aanwezigheid van Fe^{2+} en Fe^{3+}-ionen in het kristal. Wij zouden dus in principe geen gebruik willen maken van metalen, die evenals ijzer ionen van verschillende waardigheid kunnen geven, zoals bijv. Mn, Co, Ni; immers, dan zou het geleidingsvermogen veroorzaakt kunnen worden door de aanwezigheid van bijv. Co^{2+} en Co^{3+}-ionen, hetgeen wij juist willen vermijden. Uit dit oogpunt is $MgAl_2O_4$ dus het meest geschikte, niet-geleidende spinel, daar Mg en Al uitsluitend twee- resp. driewaardig kunnen zijn. Het blijkt echter, dat het mengsel van $MgAl_2O_4$ en Fe_3O_4 moeilijk tot een homogene fase samensintert. Daarom hebben wij gebruik gemaakt van de gemakkelijker sinterende chromieten. Hoewel chroom in verschillende waardigheden kan voorkomen, hebben wij onder de gegeven experimentele omstandigheden geen waardigheidsverandering van chroom bij mengkristallen van $MgCr_2O_4$ met Fe_3O_4 kunnen constateren. Het gebruik van Zn_2TiO_4 staat een nog lagere sintertemperatuur toe, doch de t.c. is niet zoo hoog als bij $MgCr_2O_4$.

Stabiliteit en reproduceerbaarheid van de temco-weerstanden

Het beginsel waarop de temco-weerstanden zijn gebaseerd, nl. halfgeleiders met een bepaalde specifieke weerstand en temperatuurcoëfficient te maken door mengkristallen te bereiden van geleidend Fe_3O_4 en een niet-geleidend spinel, heeft verschillende voordelen boven andere, reeds bekende wegen.

Men heeft nl. reeds vroeger weerstanden met de hier gezochte eigenschappen gemaakt van geleidende en niet geleidende korrels, op innige wijze gemengd en daarna door sinteren tot een samenhangende massa verenigd. Als voorbeeld zij genoemd het mengsel van Si-poeder en klei [8]). Hierbij wordt de waarde van de weerstand bepaald door de overgangsweerstand van de ene Si-korrel naar de andere. Het aantal contactpunten hangt uiteraard van de mengverhouding af; de waarde van de weerstand neemt met de kleiconcentratie toe. Deze soort weerstanden heeft allerlei bezwaren: de weerstandswaarde is uiterst gevoelig voor kleine schommelingen in de mengverhouding en moeilijk reproduceerbaar; bovendien bestaat hier altijd het gevaar dat de weerstandsmassa niet voldoende homogeen is, zodat de stroom zich gemakkelijk op bepaalde banen zal concentreren, hetgeen door de plaatselijke verwarming en daaruit voortvloeiende weerstandsverlaging zelfs tot volledige kortsluiting kan leiden [9]). Daar silicium in lucht gemakkelijk oxydeert, kunnen deze weerstanden niet zonder speciale maatregelen worden gebruikt.

Een tweede methode om weerstanden te maken die geschikt zijn voor de boven beschreven toepassingen, berust op de bereiding van stoffen met een kleine afwijking van de stoechiometrie (vgl. het in noot [1]) aangehaalde artikel). Bij deze soort stoffen neemt de weerstandswaarde in het algemeen met toenemende afwijking van de stoechiometrie af, vooral zolang de afwijking nog klein is. Bij een oxydisch materiaal, bijv. NiO, vereist het verkrijgen van een bepaalde afwijking van de stoechiometrie in de richting van te veel zuurstof een nauwkeurige instelling van de zuurstofdruk en temperatuur bij de bereiding van het materiaal. In de practijk blijkt dit moeilijk uitvoerbaar, en een reproduceerbaar instellen op een bepaalde weerstandswaarde stuit op onoverkomelijke moeilijkheden. Bovendien zal bij het gebruik een geringe verandering van het zuurstofgehalte van de stof een betrekkelijk grote verandering der weerstandswaarde ten gevolge hebben.

De vraag doet zich nu voor of de afwijking van de stoechiometrie bij de weerstanden, gemaakt op basis van Fe_3O_4, niet tot moeilijkheden kan

[8]) Deze zg. „Starto"-weerstanden zijn besproken in dit tijdschrift (Philips techn. T. 1, 205-210, 1936).

[9]) Het spreekt vanzelf dat soortgelijke moeilijkheden bij alle inhomogene weerstanden kunnen optreden, waaruit het voordeel van het gebruik van mengkristallen, die immers homogeen zijn, onmiddellijk blijkt.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

leiden. Ook Fe_3O_4 kan nl. met een zekere afwijking van de stoechiometrie worden bereid. In het bijzonder is het mogelijk een afwijking in de richting van te veel zuurstof te verkrijgen. Het is zelfs mogelijk alle samenstellingen tussen Fe_3O_4 en Fe_2O_3 te bereiden. Daarbij zijn al deze stoffen homogeen en bezitten de spinelstructuur. De relatieve overmaat aan zuurstof, vergeleken met Fe_3O_4, wordt hier nl. verkregen, doordat het rooster te weinig Fe^{2+}-ionen bevat. Het grensgeval, Fe_2O_3, (de zg. γ-modificatie van ijzeroxyde) zou dus eigenlijk in onze notatie moeten worden aangeduid als $Fe^{3+}(Fe^{3+}_{1,67})O_4$. De tussengevallen kan men als mengkristallen van Fe_3O_4 en γ-Fe_2O_3 opvatten. Echter zijn al deze mengkristallen slechts met een kunstgreep te bereiden en niet stabiel: alleen die met weinig Fe_2O_3, minder dan 10%, kunnen op de gewone manier worden bereid, door directe verhitting van ijzeroxyde in een meer of minder zuurstof bevattende atmosfeer.

Het is te verwachten dat de specifieke weerstand van deze mengkristallen met het gehalte aan Fe_2O_3 zal toenemen. Immers, hoe meer Fe_2O_3, hoe minder — volgens onze „regels" — Fe^{2+}-ionen in de octaëderholten. En dit moet zich nu uiten, indien onze verklaring van de goede geleiding in Fe_3O_4 juist is, in een toeneming van de specifieke weerstand. Bekend is, dat γ-Fe_2O_3 bijna een isolator is. De waarden die voor de specifieke weerstand van γ-Fe_2O_3 gevonden worden, zijn echter zeer onreproduceerbaar. Ten eerste, omdat γ-Fe_2O_3 niet gesinterd kan worden, zodat metingen aan poeder moeten worden verricht. Ten tweede, doordat sporen van Fe^{2+}-ionen de weerstand aanzienlijk verlagen; de situatie is dus hier vergelijkbaar met het bovenvermelde geval van NiO, dat ook door kleine afwijkingen van de stoechiometrie geleidend wordt. Bij 100% Fe_3O_4 vinden wij daarentegen dat kleine afwijkingen van de stoechiometrie de waarde van de specifieke weerstand zeer weinig veranderen.

Deze ongevoeligheid van Fe_3O_4 voor kleine afwijkingen van de stoechiometrische samenstelling blijft in het algemeen ook in de mengkristallen van Fe_3O_4 met niet-geleidende spinellen behouden. Kiest men dus de sintertemperatuur, het zuurstofgehalte van de gasatmosfeer en de duur van verhitting zodanig, dat het mengkristal ongeveer de spinelsamenstelling heeft, dan zal een kleine variatie in de bereidingswijze de weerstandswaarde weinig veranderen. Dit verklaart voor een groot deel de goede reproduceerbaarheid en tevens de grote stabiliteit van de electrische eigenschappen der temco-weerstanden. Overigens is de samenstelling zelf goed stabiel: de dichtgesinterde materialen zijn betrekkelijk weinig reactief; bovendien schijnt de reactie van Fe_3O_4 met zuurstof door de aanwezigheid van het andere spinel vertraagd te worden. Daardoor kunnen de temco-weerstanden bij vele toepassingen waarbij de omgevingstemperatuur laag genoeg of de belasting zwak genoeg is, zodat de temperatuur niet boven een paar honderd graden Celsius komt, onbeschermd worden gebruikt. (Bij nog hogere temperaturen moeten zij in een beschermend gas, bijv. stikstof, of in vacuum worden toegepast.) Neemt men bovendien in aanmerking dat men gemakkelijk elke gewenste weerstandswaarde van de temco-weerstanden kan verwezenlijken door de keuze van de mengverhoudingen van Fe_3O_4 en een niet-geleidend spinel in het mengkristal, dan zullen de grote voordelen van deze nieuwe materialen boven de tot dusver gebruikte nog duidelijker worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

DE DROOGSTRALER EN ZIJN VOORNAAMSTE TOEPASSINGEN

door Th. J. J. A. MANDERS. 621.384.3:66.047

Bij vele droogprocessen in de industrie gebruikt men tegenwoordig droogstralers, waaronder men speciaal voor dit doel ontworpen electrische infrarood-bronnen verstaat. In dit artikel worden eerst enige eigenschappen van de infrarode stralen gememoreerd. Dan wordt nagegaan hoe infrarode stralen in een waterlaag geabsorbeerd worden en hoe zij zich gedragen ten opzichte van lakken. Vervolgens wordt onderzocht aan welke voorwaarden een droogstraler moet voldoen. Bij het ontwerpen van de Philips droogstraler is getracht deze zo goed mogelijk aan de gestelde eisen te doen beantwoorden. In allerlei fabrieken gebruikt men voor het drogen van halffabrikaten of eindproducten installaties die met een groot aantal droogstralers toegerust zijn. Van de vele toepassingsmogelijkheden, die de droogstraler biedt, worden voornamelijk besproken het drogen van lakken en het drogen van textiel en papier.

Inleiding

Drogen is een proces dat in vele industrieën toegepast wordt. Het onderzoek naar de beste productiemethode heeft er de laatste tijd in vele gevallen toe geleid, dat men van oude droogmethoden (bijv. een met kolen verhitte oven) is overgegaan op het gebruik van droogstralers. Dit zijn electrische infrarood-bronnen, speciaal voor dit doel ontworpen.

Het drogen beoogt gewoonlijk het laten verdampen van water of een andere vloeistof. In sommige gevallen treedt tevens een scheikundige omzetting op, bijv. oxydatie bij het harden van olielakken en polymerisatie bij het drogen van synthetische lakken.

In de regel wordt een droogproces door verwarming versneld. Deze verwarming is een kwestie van warmte-overdracht. Het is wel bekend, dat deze overdracht op drie manieren mogelijk is, nl. door

a) geleiding
b) stroming of convectie
c) straling.

Onder de droogmethoden, die in de industrie gebruikt worden, speelt geleiding een ondergeschikte rol. In het geval van convectie wordt de warmte van de warmtebron door een medium (een vloeistof of een gas) op het te verwarmen voorwerp overgebracht. De warmte-overdrachtscoëfficient is bij de overgang lucht-metaal klein en bij lucht-lak nog kleiner. Daarna moet de warmte door geleiding nog dieper in het voorwerp doordringen, Ook de warmtegeleidingscoëfficient is bij de meeste te drogen stoffen klein. Dit zijn twee ongunstige factoren bij verwarming door convectie, welke bij straling niet optreden. Hierbij wordt de warmte nl. geheel zonder medium overgedragen. Met deze methode worden dan ook in het algemeen de beste resultaten bereikt. Indien de omstandigheden gunstig zijn gekozen, wordt de energie in het voorwerp overal gelijktijdig, tot op een bepaalde diepte, geabsorbeerd en in warmte omgezet. In de lagen, waarin dit gebeurt, treedt een snelle en gelijkmatige temperatuursverhoging op. Daaruit moet het verklaard worden, dat de droogtijd bij straling in de regel veel korter is dan bij stroming.

Bij de droogstraler geschiedt de warmte-overdracht grotendeels door infrarode straling. Het is daarom gewenst, dat we, alvorens tot ons eigenlijke onderwerp te komen, een kort exposé geven van enige eigenschappen van infrarode straling. Bij de bespreking van de droogstraler en zijn toepassingen zullen wij daarnaar telkens moeten verwijzen.

De eigenschappen van infrarode straling

De golflengte van infrarode straling is groter dan die van rood licht. De grens tussen zichtbare en onzichtbare straling ligt bij ongeveer 7600 ångström. Men heeft echter ook infrarode straling met een golflengte van $4{,}2 \cdot 10^6$ Å waargenomen. Vaak vergelijkt men de lichttrillingen met geluidstrillingen. Het zichtbare licht omvat dan één en het infrarode negen octaven.

Om de aard der straling van een vast lichaam te beoordelen, kan men een grafiek opstellen van de uitgezonden energie als functie van de golflengte. Het blijkt dan, dat deze verdelingskromme bij elke temperatuur van het lichaam voor één bepaalde golflengte een maximum heeft.

In *fig. 1* is de verdelingskromme weergegeven voor een zwarte straler met een temperatuur van 6000 °K, voor een fotolamp („Photolita"), een normale gloeilamp („Bi-Arlita"-lamp) en de in dit artikel besproken droogstraler. Bij een temperatuur van 6000 °K ligt het maximum der straling bij de golflengte 4800 Å. Bij de „Photolita"-lamp is de gloeidraadtemperatuur 3400 °K en $\lambda_{max} =$ 8150 Å, bij de 100 watt „Bi-Arlita"-lamp zijn deze getallen 2850 °K en 9500 Å. Bij de droogstraler

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

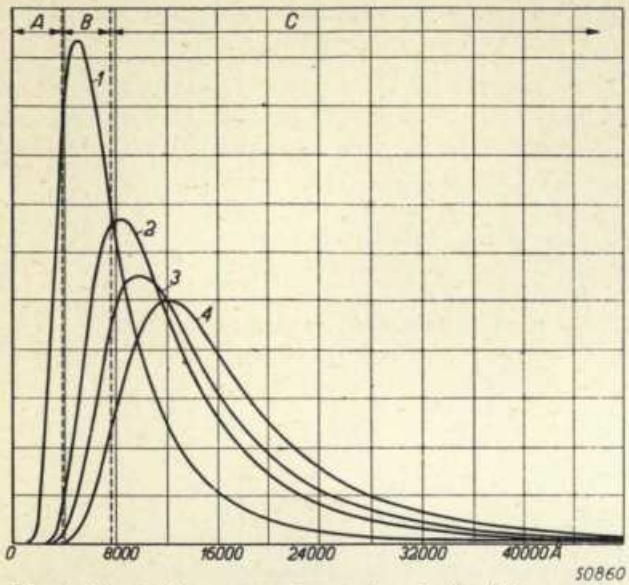

Fig. 1. De relatieve spectrale energieverdeling bij een gelijke hoeveelheid totaal uitgezonden energie voor enige stralers.
1) Voor een zwart lichaam bij een temperatuur van 6000 °K.
2) Voor de spiraal van een „Photolita" N-lamp (temperatuur 3400 °K).
3) Voor de spiraal van een 100 watt „Bi-Arlita" lamp (2850 °K).
4) Voor de 250 watt droogstraler met een temperatuur van 2200 °K.
A is het gebied der ultraviolette straling, *B* dat van het zichtbare licht en *C* dat van de infrarode straling.

bedraagt de temperatuur van de wolfraamspiraal 2200 °K en is de golflengte der maximale emissie 12 000 Å.

Er bestaat voor zwarte stralers een eenvoudig verband tussen de absolute temperatuur T van het gloeilichaam en de golflengte van de maximale emissie. Dit is de verschuivingswet van Wien:

$$\lambda_{max}\, T = 288 \cdot 10^5,$$

waarbij λ_{max} in ångström en T in graden Kelvin uitgedrukt is. Daar alle bestaande gloeilichamen in meerdere of mindere mate van een zwarte straler verschillen, zullen de daarvoor geldende verschuivingswetten afwijken van die van Wien. Volgens Geiss geldt voor een wolfraamplaatje in het temperatuurgebied van 2200 °K tot 3400 °K de verschuivingswet [1])

$$\lambda_{max}\, T = 263 \cdot 10^5 + (T - 2500) \cdot 10^3$$

en voor een wolfraamspiraal, waarbij het aandeel aan de straling, dat het gedeelte tussen de spiraalwindingen oplevert, nagenoeg als zwart beschouwd kan worden, voor hetzelfde interval:

$$\lambda_{max}\, T = 268 \cdot 10^5 + (T - 2500) \cdot 10^3.$$

Met behulp van deze betrekking is het mogelijk een lamp te ontwerpen, waarvoor de golflengte der maximale emissie een bepaalde waarde heeft.

Met het oog op het gebruik van droogstralers voor het verdampen van water, is het voor ons van belang na te gaan wat er gebeurt, wanneer infrarode stralen op een waterlaag vallen.

Water laat zichtbaar licht gemakkelijk door, maar voor infrarode stralen is het weinig transparant. Uit het onderzoek van dunne waterlagen heeft men gevonden, dat de voornaamste absorptiebanden in het infrarode deel van het spectrum liggen bij golflengten van 15 000, 20 000, 30 000, 47 500 en 60 000 Å. In *fig. 2* is de grootte van de transmissie van infrarode straling van verschillende golflengte door waterlagen van verschillende dikte grafisch voorgesteld. Uit deze afbeelding blijkt, dat de straling met een golflengte boven 14 000 Å practisch volledig wordt geabsorbeerd door de waterlaag, tenzij de dikte hiervan heel gering is, nl. minder dan 0,5 mm.

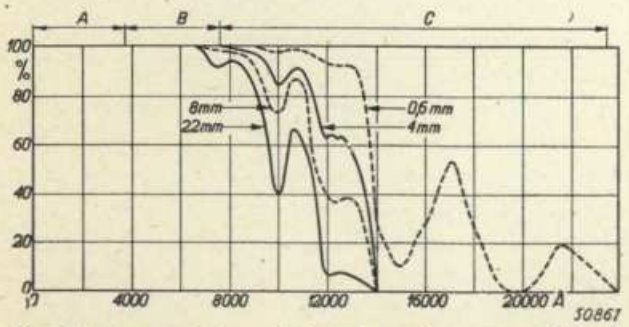

Fig. 2. De transmissie van infrarode stralen van verschillende golflengte door waterlagen van verschillende dikte. Het blijkt, dat de lagen, die resp. 22, 8 en 4 mm dik zijn, alle energie met een golflengte boven 14 000 ångström absorberen.

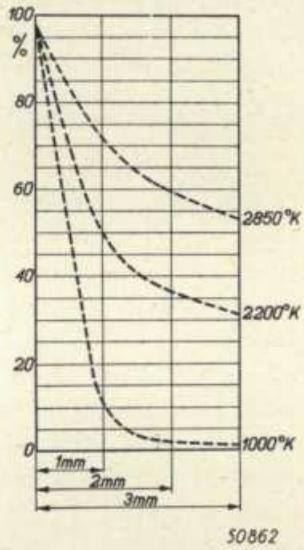

Fig. 3. De transmissie van de energie, die drie verschillende infrarood-bronnen (een normale gloeilamp, een droogstraler en een verwarmingselement van 1000 °K) uitzenden, door de opeenvolgende lagen van een vat met water. Van de straling, die een droogstraler uitzendt, wordt in de eerste, tweede en derde millimeterlaag resp. 50%, 13% en 5% geabsorbeerd.

[1]) W. Geiss, Trocknen mit infraroten Strahlen, Elektrizitätsverwertung **20**, 287-293, 1945/'46.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Uit fig. 1 blijkt echter, dat de gebruikelijke lampen een continu spectrum, dus energie van zeer verschillende golflengten uitzenden. Daarom heeft het zin te onderzoeken, in welke waterlagen de stralen, die verschillende infrarood-bronnen uitzenden, voornamelijk geabsorbeerd worden. In *fig. 3* geven de grafieken aan, hoe de transmissie verloopt als functie van de laagdikte bij bestraling met een verwarmingselement (temperatuur 1000 °K), een wolfraamdraadlamp (2850 °K) en de Philips droogstraler (2200 °K).

Droogstralers hebben ook veel toepassing gevonden bij het drogen van lakken. Daarom vragen wij ten slotte nog, hoe infrarode stralen zich gedragen tegenover de meest voorkomende laksoorten. Dit blijkt uit *fig. 4*, waarbij de kromme *1* een oriën-

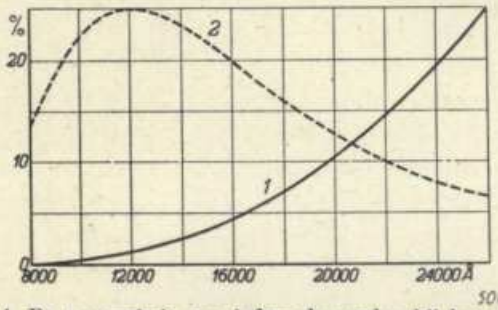

Fig. 4. De transmissie van infrarode stralen bij het gebruik van de droogstraler voor lakken. Kromme *1* geeft een beeld van de doorlating van een bepaalde laksoort voor infrarode energie van verschillende golflengten. Ter vergelijking is in kromme *2* de spectrale energieverdeling van de Philips droogstraler getekend.

terende indruk geeft van de transmissie van infrarode energie door lakken als functie van de golflengte. Men moet daarbij wel in aanmerking nemen, dat de vorm van deze kromme afhankelijk is van de dikte der laag en van de laksoort. Het blijkt, dat in dit geval de energie van infrarode straling met een golflengte $< 14\,000$ Å nagenoeg geheel wordt geabsorbeerd. Indien men echter straling met een langere golflengte gebruikt, dan wordt steeds meer energie doorgelaten. Ter vergelijking is in dezelfde figuur (kromme *2*) ook de spectrale energieverdeling van de Philips droogstraler getekend.

Met behulp van de hier vermelde eigenschappen van infrarode straling is het nu mogelijk aan te geven hoe een droogstraler het best kan worden geconstrueerd.

Voorwaarden waaraan een droogstraler moet voldoen

Wanneer men een droogstraler gaat ontwerpen, is de belangrijkste vraag wat de golflengte van de maximale emissie moet zijn. We hebben reeds gezien, dat deze λ_{max} afhangt van de absolute temperatuur van de gloeidraad der lamp tijdens de bestraling.

Het is van belang, dat de straling in het te drogen voorwerp zo volledig mogelijk en op de juiste plaats in warmte wordt omgezet. Indien de absorptie alleen aan de oppervlakte plaats heeft, betekent dit, dat de dieper liggende lagen door geleiding verwarmd moeten worden. Daar de meeste stoffen, die gedroogd moeten worden, slechte warmtegeleiders zijn, is dit niet gewenst. Bij lakken komt hier nog het bezwaar bij, dat bij sterke oppervlaktedroging de huid reeds taai wordt, terwijl de onderste lagen nog week zijn. Maar te grote transmissie betekent, dat er energie verloren gaat, of dat de onderlaag te sterk verwarmd wordt. Het is dus van groot belang de verhouding tussen absorptie en transmissie zorgvuldig af te wegen. Ideaal is het geval, waarbij er voldoende energie tot dicht bij de onderlaag doordringt, zodat de gehele laag, die gedroogd moet worden, straling absorbeert en bovendien de onderlaag matig verwarmd wordt.

Wanneer de droogstraler gebruikt moet worden om water te laten verdampen, kunnen we uit fig. 2 afleiden wat de golflengte van de maximale emissie en dus ook de temperatuur van de gloeidraad van de lamp moet zijn. Uit de daar gegeven grafiek blijkt, dat de energie van infrarode stralen, wier golflengte groter dan 14 000 Å is, practisch volledig in de bovenste laag geabsorbeerd wordt, behalve wanneer de waterlaag heel dun, bijv. < 1 mm is. Om te bereiken, dat de straling voldoende diep in de waterlaag doordringt, moet men dus λ_{max} kleiner nemen, maar de golflengte mag niet zo kort genomen worden, dat te veel straling doorgelaten wordt.

Uit fig. 3 ziet men, dat een straler met een temperatuur van bijv. 2850 °K voor ons doel niet bruikbaar zou zijn. Van de energie van zijn straling zou het water een te groot gedeelte doorlaten [2]).

Een tweede bezwaar van een zo hoge temperatuur is de invloed daarvan op de levensduur van de straler, die economisch verantwoord moet zijn.

Een λ_{max} van 12 000 Å blijkt voor het verdampen van water een goede oplossing te bieden. De hiermede corresponderende gloeidraadtemperatuur is 2200 °K. Uit fig. 3 blijkt, hoe de absorptie van de energie van zulk een straler in de opeenvolgende lagen is. In de eerste millimeter water wordt 50% opgenomen, in de tweede 13%, en in de derde 5%.

Nu we gezien hebben wat een geschikte gloeidraadtemperatuur is voor het verdampen van water,

[2]) Hiermede houdt verband, dat de „Infraphil", een apparaat voor medische theraphie met infrarode stralen, is uitgerust met een lamp die een gloeidraadtemperatuur van 2800 °K heeft. De straling van deze lamp moet nl. door de waterhoudende epidermis heen de lager gelegen weefsels verwarmen. Vgl. Philips techn. T. 8, 177-182, 1946 (No. 6).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

komt de vraag aan de orde, hoe een straler moet worden ingericht voor het drogen van lakken. Hierop geeft fig. 4 een antwoord. Men ziet daaruit, dat het gewenst is, dat de top van de verdelingskromme in elk geval beneden 15 000 Å ligt, omdat anders de transmissie te groot wordt. Wanneer hieraan voldaan wordt, blijkt verder, dat de waarde van λ_{max} bij deze toepassing niet zeer critisch is. Bij nader onderzoek is nl. gevonden, dat het nagenoeg geen invloed op de droogtijd heeft, wanneer men λ_{max} bij 12 000 Å dan wel iets lager of hoger neemt. Blijkbaar kan men dus voor lakken dezelfde straler gebruiken als voor water.

Nu de geschiktste golflengte voor de maximale emissie gevonden is, kunnen we vragen naar de voorwaarden, waaraan de stralingsbron verder moet voldoen.

De gevonden temperatuur is zo hoog, dat het nodig is de gloeidraad in een afgesloten ballon onder te brengen. Ter vermindering van de verdamping wordt deze, evenals bij gloeilampen, met een inert gas gevuld.

De straler behoort zo geconstrueerd te zijn, dat een zo groot mogelijk deel van de straling op het te drogen voorwerp valt. Daarom is het nodig de straling, die niet in de gewenste richting wordt uitgezonden, te reflecteren. Bij de constructie van een reflector moet men er echter rekening mede houden, dat het reflectievermogen van verschillende stoffen afhankelijk is van de golflengte van de straling. *Fig. 5* geeft voor zichtbaar licht

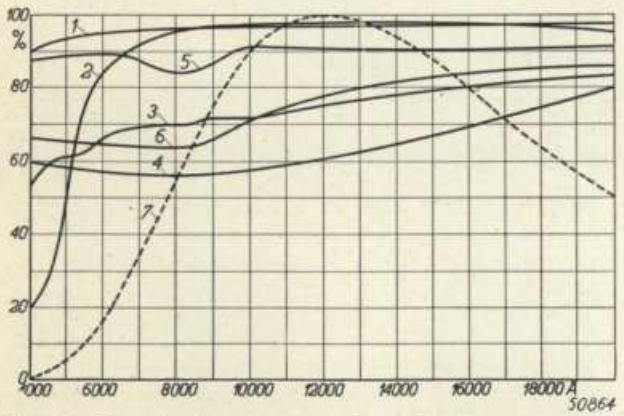

Fig. 5. Het reflectievermogen, uitgedrukt in procenten der opvallende energie, voor enige metalen, die gebruikt kunnen worden als materiaal voor de spiegel van een droogstraler. *1* is zilver, *2* goud, *3* nikkel, *4* chroom, *5* opgedampt en *6* gepolijst aluminium. Ter vergelijking is de spectrale energieverdeling van de straler (kromme *7*) in dezelfde figuur getekend.

en het belangrijkste gebied der infrarode straling (7600 tot 20 000 Å) een overzicht van het verloop van de reflectiecoëfficienten van enige stoffen, die hierbij in aanmerking komen. Het blijkt, dat in het genoemde gebied zilver een grote terugkaatsing geeft (92-98%), evenals goud (84-98 %). Nikkel (65-80 %) en chroom (58-70%) zijn minder goed bruikbaar. Verder blijkt uit de figuur, dat opgedampt aluminium (in tegenstelling met gepolijst aluminium) een bijzonder goede reflector is.

De keuze tussen zilver, goud en aluminium als materiaal voor de reflector hangt ten slotte nog samen met de vraag, of men een spiegel aan de buitenkant of in de ballon wil aanbrengen. In Amerika gebruikt men veelal een uitwendige reflector. Dan is men, bijv. bij het drogen van lakken, gewoonlijk op een goudspiegel aangewezen met het oog op aantasting van de spiegel door lakdampen. In Europa gebruikt men meestal een inwendige reflector. Als voordelen daarvan kunnen worden genoemd:

1) Dat deze veel beter dan een uitwendige spiegel zijn hoog reflectievermogen behoudt, daar hij niet aan chemische of mechanische invloeden onderworpen, en stofvrij is.
2) Dat hij minder plaats vraagt en er geen speciale bevestiging voor nodig is.
3) Dat de gehele straling slechts eenmaal de ballonwand passeert. Dit laatste punt betekent minder absorptie in de glaswand; want bij een uitwendige reflector zal een deel der straling driemaal de ballonwand passeren.

Wanneer men een straler met een inwendige spiegel wil construeren, zijn goud, zilver en in vacuum opgedampt aluminium wat reflectie betreft ongeveer even goed bruikbaar. Daar goud belangrijk duurder is en zilver in dit geval uit een oogpunt van fabricage minder gunstig is, is gebruik gemaakt van aluminium. Deze aluminium reflector wordt „opgedampt" tegen het inwendige van de glazen ballon.

Om een goede bundelvorming te krijgen is het gewenst de reflector de vorm van een paraboloïde te geven en het stralerlichaam zo goed mogelijk in het brandpunt daarvan te plaatsen.

De zoëven aangeroerde kwestie van absorptie in de glaswand is, wanneer de straling slechts eenmaal passeert, niet heel belangrijk. Uit een grafiek van het doorlatingsvermogen van normaal kalkglas bij een wanddikte van 1 mm voor verschillende golflengten [3]) blijkt, dat pas bij $\lambda = 25\,000$ Å een duidelijke absorptie begint op te treden. In het gebied, dat voor ons van belang is, is de doorlating goed.

De eigenschappen van de Philips droogstraler

Wij geven nu een korte beschrijving van het nieuwste type van de Philips droogstraler. Als gevolg van de bovenvermelde overwegingen en ook

[3]) Philips techn. T. **8**, 180, 1946 (No. 6).

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

nog op lampentechnische gronden, waar wij hier niet op ingaan, heeft deze de uitvoering gekregen, die in *fig. 6* getekend is. *Fig. 7* geeft een foto van deze droogstraler. De glazen ballon heeft een parabolisch gedeelte en een sferische verwijding ter hoogte van de gloeidraad.

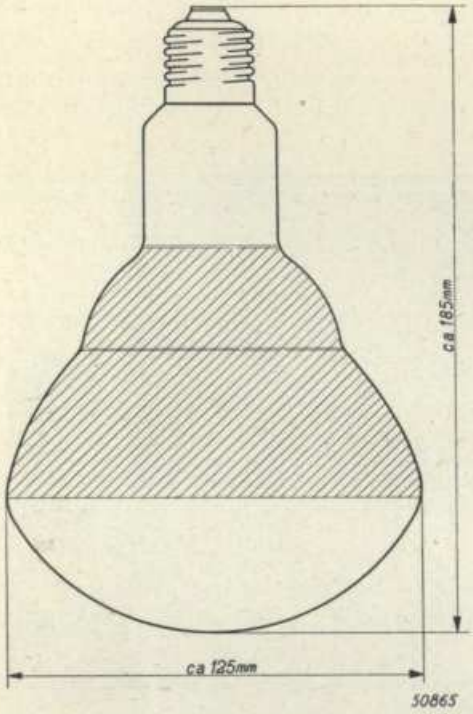

Fig. 6. Afmetingen en vorm van de Philips droogstraler.

Het gloeilichaam is een wolfraamspiraal, die in het bedrijf 250 watt opneemt. De daarbij bereikte temperatuur van 2200 °K bepaalt, zoals reeds is aangestipt, ook de levensduur van de lamp. Bij een gewone gloeilamp (bijv. 100 W „Bi-Arlita", temperatuur 2850 °K) bedraagt deze 1000 branduren, bij de droogstraler 5000. De ballonbodem is verhoudingsgewijs sterk convex gemaakt, waardoor een stevige vorm verkregen is. Om een gelijkmatige bestraling te krijgen, is de ballonwand licht gesatineerd en zijn de afmetingen van het gloeilichaam zo klein mogelijk genomen. De droogstraler kan van een Edison- of Swan-huls worden voorzien. Bij temperaturen boven 200 °C is de gebruikelijke verbinding tussen lamp en huls met kit („gips") niet betrouwbaar meer. Daarom is een lampvoet in ontwikkeling waarbij deze verbinding zonder kit wordt bewerkstelligd.

Met behulp van een thermozuil is de bestralingssterkte gemeten in verschillende punten van vlakken, loodrecht op de as van de straler. Deze vlakken waren op afstanden variërend van 10 tot 100 cm van de stralingsbron verwijderd. *Tabel I* vermeldt de uitkomsten in mW/cm². Ter vergelijking diene, dat de bestralingssterkte der zon bij de hoogste zonnestand onder de gunstigste omstandigheden 100 mW/cm² bedraagt.

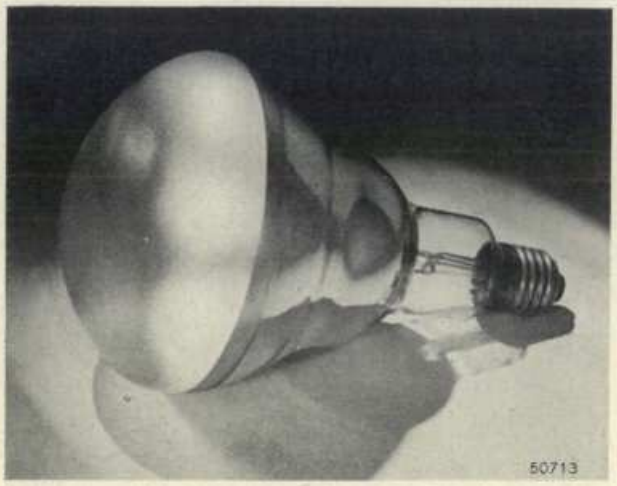

Fig. 7. De Philips droogstraler voor 250 watt.

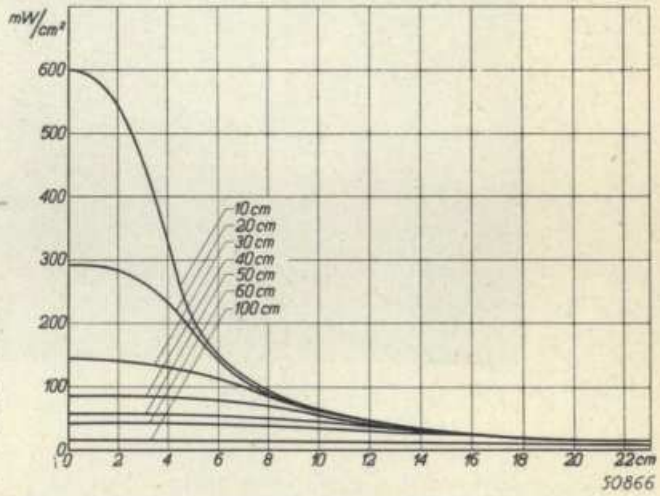

Fig. 8. Grafische voorstelling van de verdeling der bestralingssterkten (in mW/cm²) op vlakken die loodrecht op de lampas op verschillende afstanden van een droogstraler zijn aangebracht. Deze afstanden variëren van 10 tot 100 cm. Op de horizontale as is de afstand van het beschouwde punt tot de lampas uitgezet.

Tabel I. De bestralingssterkte op verschillende afstanden van de stralingsbron in mW/cm². De afstand van de onderkant van de straler tot het meetvlak (in cm) is door *h* voorgesteld en de afstand van het meetpunt tot de as van de straler (in cm) door *r*.

h \ *r*	0	2½	5	10	15	20	30	40	50	60
10	600	500	250	65	32	19	10	5	3	2
20	290	275	190	65	31	19	10	5	3	2
30	145	140	125	65	30	18	10	5	3	2
40	85	85	80	56	29	18	9	5	3	2
50	56	56	53	43	26	17	9	5	3	2
60	42	42	40	33	23	15	9	5	3	2
100	14	14	14	14	13	12	9	5	3	2

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Figuur 8 geeft een grafische voorstelling van de verdeling der bestralingssterkten. Uit de tabel en de grafiek blijkt, dat bij vlakken, die 20 tot 60 cm van de onderkant van de ballon verwijderd zijn, binnen een kegel met een tophoek van 30° van een gelijkmatige bestralingssterkte gesproken kan worden. Met behulp van deze gegevens is het mogelijk de gunstigste opstelling van de stralers, wanneer er meer dan één gebruikt wordt, ten opzichte van elkaar en het object te bepalen.

Het zal maar heel zelden gebeuren, dat voor een bepaald doel één droogstraler gebruikt wordt. In de industrie werkt men gewoonlijk met drooginstallaties die een groot aantal stralers bevatten.

De droogtijd hangt van verschillende factoren af:

a) de soort van de stof, die gedroogd moet worden,
b) de aard van de ondergrond (zijn dikte en zijn warmtegeleidingsvermogen),
c) de afstand van de stralers tot het voorwerp en het aantal stralers, met andere woorden het aantal watts, dat per cm² geleverd wordt.

In fabrieken zal men de voorwerpen, die gedroogd moeten worden, gewoonlijk op een transportband plaatsen. Deze wordt dan bewogen door een tunnel, waarin zich een aantal stralers bevinden, die op de band gericht zijn. Het aantal stralers, de bestralingsafstand en de snelheid van de transportband moeten zo gekozen worden, dat aan het einde van de tunnel de droging voltooid is, waarbij rekening gehouden moet worden met de maximaal toelaatbare temperatuur voor de te drogen voorwerpen.

In *fig. 9* is zulk een droogtunnel, uitgerust met droogstralers, afgebeeld.

Als hulpmiddel bij het opbouwen van dergelijke installaties kunnen bouwelementen worden gebruikt, die bestaan uit het eigenlijke schakelstuk en een lamphouder (zie fig. 9). De bouwelementen kunnen op een eenvoudige manier samengesteld worden tot grotere eenheden in platte of gebogen vlakken. *Fig. 10* geeft daar nog een voorbeeld van.

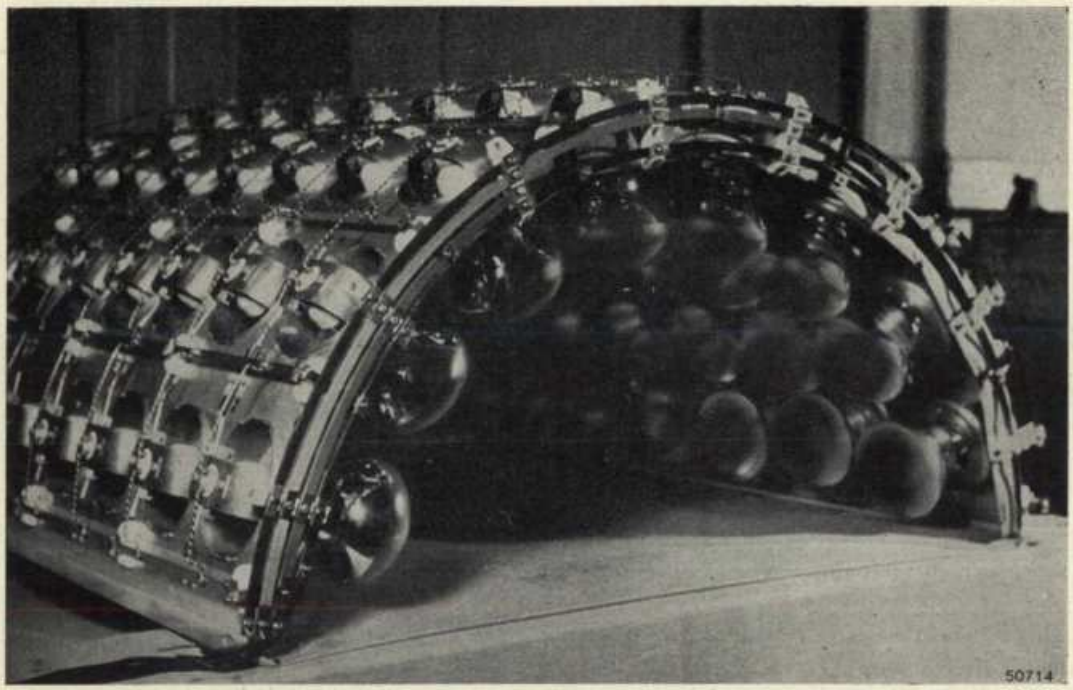

Fig. 9. Een droogtunnel met Philips droogstralers, opgebouwd uit „bouwelementen" die ieder één droogstraler bevatten.

Toepassingsmogelijkheden

Het drogen van lakken

We hebben er boven reeds op gewezen, dat het drogen van gelakte voorwerpen een belangrijke toepassing is van de droogstralers.

Lakken bevatten een bindmiddel, dat niet vluchtig is, en een oplossingsmiddel, dat vervluchtigt. Bovendien bevatten de meeste lakken nog een vulstof of pigment, meestal een anorganische verbinding, die niet oplost, maar heel fijn verdeeld door de lak gemalen is en haar een bepaalde kleur geeft.

De voornaamste laksoorten zijn: oliehoudende, synthetische en cellulose-lakken. De droog- en verhardingsprocessen berusten bij elk van deze soorten op verschillende principes. In elk van de drie gevallen moet weliswaar het oplosmiddel verdampt worden; maar de harding van olielakken

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

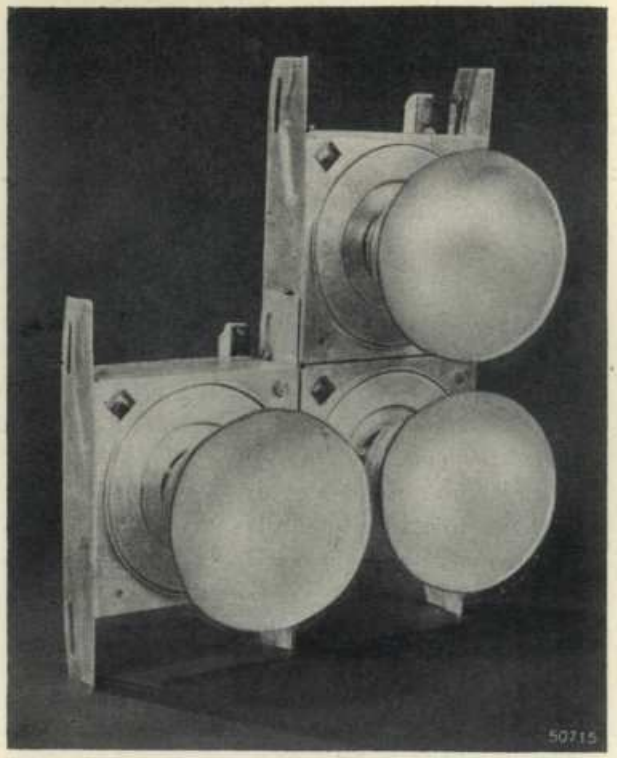

Fig. 10. Combinatie van drie bouwelementen (nieuw type), ieder voorzien van een droogstraler.

gebeurt door oxydatie van het bindmiddel (de olie), terwijl bij de synthetische lakken (zo genoemd omdat zij synthetische harsen bevatten) de harding van het bindmiddel in zekere mate ook door oxydatie geschiedt, doch hoofdzakelijk door polymerisatie. Bij de celluloselakken gaat het alleen om verdamping van het oplosmiddel.

Zowel het verdampen van het oplossingsmiddel als het oxyderen of polymeriseren van het bindmiddel zijn processen, die door temperatuursverhoging versneld worden. De temperatuur mag echter niet onbeperkt worden opgevoerd, omdat een al te snelle dampvorming in de laklaag blazen kan doen ontstaan en een te hoge temperatuur ook de kleur kan beïnvloeden.

Naar de temperatuur, waarbij zij drogen, worden de laksoorten verdeeld in aan de lucht drogende lakken, die reeds bij kamertemperatuur goed drogen, en moffellakken, die beneden een bepaalde temperatuur practisch niet drogen. Bij de laatste moet het droogproces plaats hebben tussen deze bepaalde temperatuur en de maximaal toelaatbare temperatuur. Het is gewenst, dat de werkelijk gebruikte temperatuur de maximale zoveel mogelijk benadert. Experimenteel blijkt, dat tijdens het drogen de temperatuur van de laklaag tamelijk wel constant blijft. Men vond bijv. voor moffellakken op alkydharsbasis van verschillende kleur na 10 minuten bestraling dezelfde hardheid als na 60 minuten in een moffeloven. Dit opent grote mogelijkheden voor productieverhoging of ruimtebesparing.

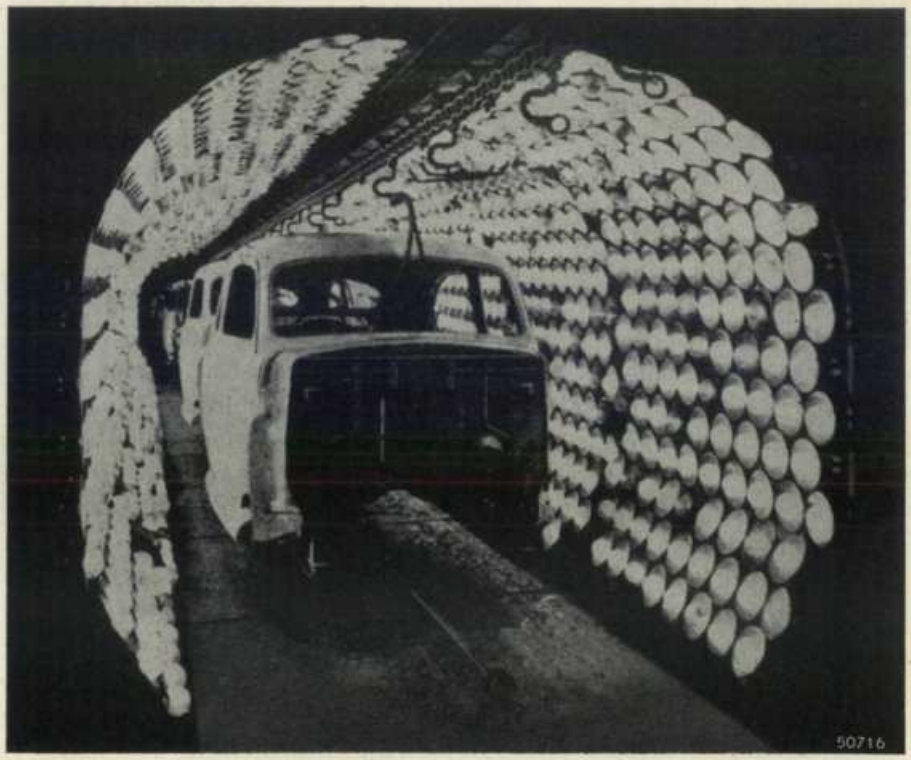

Fig. 11. Een droogtunnel, waar een carrosserie op een lopende band wordt doorgevoerd, zoals die bij de Ford Motor Company te Detroit in gebruik is.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!

www.freeservicemanuals.info 11/14/2023

Een der eerste firma's in Amerika, die de droogstralers op grote schaal heeft toegepast, is de Ford Motor Company. Daarbij worden droogstralers gebruikt voor het drogen van gelakte autocarrosserieën, wat vroeger door stoom gebeurde. *Fig. 11* toont een droogtunnel van de Ford Motor Company te Detroit, voor carrosserieën, welke er met een transporteur continu doorgevoerd worden.

Omstreeks 1939 waren bij de Fordfabrieken reeds 35 000 droogstralers in gebruik. Voor het drogen van de grondlak gebruikt men er een oven, die uit twee helften bestaat. Deze worden om de carrosserie gebracht, die aan een transporteur hangt. De oven loopt 7 minuten mee. Daarna is de grondlak gedroogd, terwijl hiervoor vroeger 30 minuten nodig waren. De droogtijd werd bij de aflaklaag zelfs van 80 tot 14 minuten teruggebracht.

Niet alleen in automobielfabrieken, maar in tal van andere industrieën waarbij het drogen van lakken een belangrijke rol speelt (bijv. ook in de vliegtuigfabrieken), wordt tegenwoordig van droogstralers een veelvuldig gebruik gemaakt.

Het drogen van textiel en papier

In de textiel- en papierindustrie worden droogstralers gebruikt om het overtollige water uit halffabrikaten of eindproducten te verwijderen.

Het Vezelinstituut te Delft, een laboratorium voor het onderzoek van textielgarens, heeft een reeks proefnemingen gedaan over het drogen van textiel met droogstralers. Daarbij werd nagegaan, of de droging door middel van droogstralers een nadelige invloed uitoefent op de breukkracht, de rek bij breuk en de tint van ongeverfde en geverfde weefsels van wol, katoen, linnen en kunstzijde. Als resultaat van een groot aantal practijkproeven werd vastgesteld, dat bestraling door een droogstraler geen enkele nadelige invloed heeft op de genoemde eigenschappen bij deze vier stoffen. Verder wordt door het Vezelinstituut onderzocht hoe vezelstoffen met behulp van droogstralers het meest economisch gedroogd kunnen worden.

In verschillende textielfabrieken vinden de droogstralers reeds toepassing. We noemen één voorbeeld. In een textielfabriek werden opgespoelde garens vroeger in een oven geplaatst om daar gedurende 4 tot 16 uur te drogen. Men kon dan 45 kg garen drogen in 4 uur, waarbij 7% vocht verwijderd werd. Nu worden de garens overgespoeld met een snelheid van 27,5 m/min en daarbij in een brede strook naast elkaar onder een wand van stralers met een vermogen van 11 kW doorgeleid. Onder de laag draden is een reflecterende plaat aangebracht, welke de doorgelaten straling op de draden terugwerpt. Op deze wijze kan men nu in 1 uur evenveel garen drogen als vroeger in 4 uren.

Ook bij de papierfabricatie worden de droogstralers met succes toegepast. Ter illustratie hiervan een tweetal voorbeelden.

Wanneer men de temperatuur van de papierbaan onmiddellijk voordat de laatste maal vocht eruit geperst wordt, tot 55 à 75 °C verhoogt, zal de viscositeit van het water kleiner worden, zodat het er gemakkelijker uitgeperst kan worden. Dit is reeds lang bekend, maar het was heel moeilijk om deze temperatuursverhoging op een practisch bruikbare manier te verwezenlijken. Met droogstralers werd een oplossing verkregen, die uitstekend voldoet. Het bleek toen, dat als gevolg daarvan bij dezelfde perskracht 25-35% meer vocht uit het papier geperst werd, wat tot een belangrijke verbetering der bedrijfsresultaten leidde.

In een andere fabriek had de nadroging van het papier plaats door electrische weerstandselementen. Hiervoor had men een installatie met een vermogen van 18,5 kW. Nadat droogstralers in gebruik waren genomen, kon men bij dezelfde droogtijd volstaan met een vermogen van 4,2 kW. De energiebesparing bij overgang op de nieuwe methode bedroeg hier dus 75%.

Verdere gebruiksmogelijkheden

Op verschillende andere gebieden wordt nog gebruik gemaakt van droogstralers, bijv. voor het drogen van leder in leder- en in schoenfabrieken, voor het drogen van tabak en van ontwikkelde films.

Een belangrijke toepassing is die van het drogen van gras. Deze zaak bevindt zich nog in het stadium van experimenteren. Wanneer zij inderdaad in het groot uitgevoerd wordt, zal dit een omwenteling in het landbouwbedrijf kunnen betekenen. Men kan nl. in een seizoen slechts één- of tweemaal hooien, maar 5 à 7 maal het jonge gras maaien en drogen. Uit voorlopige experimenten is gebleken, dat installaties die met stralers werken, ongeveer hetzelfde rendement opleveren als droogmachines die cokes gebruiken. Bij de toepassing van droogstralers verkrijgt men echter een product van betere kwaliteit, terwijl de installatiekosten naar schatting belangrijk lager liggen.

Ook heeft men droogstralers gebruikt voor het drogen van groenten en het conserveren van vruchten.

Ongetwijfeld zullen in de toekomst nog vele toepassingsgebieden voor deze stralers ontsloten worden.

Digitized in Heiloo the Netherlands Not for sale!